



**Уральский  
федеральный  
университет**

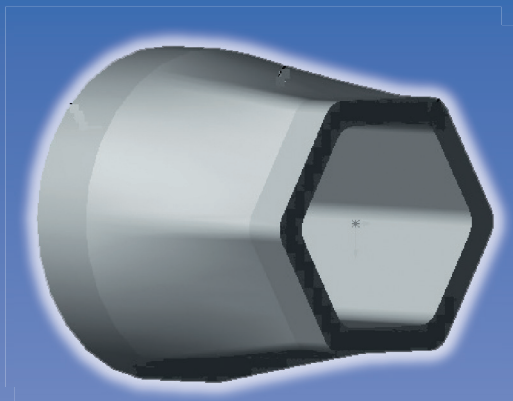
имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Механико-  
машиностроительный  
институт**

**В. С. ПАРШИН  
Н. В. СЕМЕНОВА**

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ

Учебное пособие





Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. С. Паршин  
Н. В. Семенова

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом УрФУ  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
15.03.02 — Технологические машины  
и оборудование

Под общей редакцией доктора технических наук,  
профессора В. С. Паршина

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2016

УДК 621.643.07(075.8)

ББК 34.748я73

П18

Рецензенты:

кафедра автомобилестроения УГЛТУ (завкафедрой д-р техн. наук, проф.  
*Е. Е. Баженов*);

д-р техн. наук, проф. *О. С. Лехов* (РГППУ)

**Паршин, В. С.**

П18 Моделирование процессов изготовления профильных труб : учебное пособие / В. С. Паршин, Н. В. Семенова. — Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2016. — 124 с.

ISBN 978-5-7996-1714-1

Учебное пособие соответствует программе курса «Математическое моделирование технологических процессов», а также может быть использовано при изучении курса «Программное обеспечение САПР».

Рассмотрено оборудование для производства профильных труб. Разработаны модели процесса получения профильных труб. Дан анализ результатов моделирования и приведены рекомендации по совершенствованию рассматриваемого процесса.

Библиогр.: 11 назв. Табл. 3. Рис. 52.

УДК 621.643.07(075.8)

ББК 34.748я73

---

*Учебное издание*

**Паршин** Владимир Сергеевич  
**Семенова** Наталья Владимировна

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ**

Подписано в печать 31.03.2015. Формат 60×84/16. Бумага писчая. Печать цифровая.  
Гарнитура Newton. Уч.-изд. л. 6,0. Усл. печ. л. 7,2. Тираж 100 экз. Заказ 71.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5. Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4. Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13. Факс: 8(343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru

ISBN 978-5-7996-1714-1

© Уральский федеральный  
университет, 2016

# Введение

---

**М**етод моделирования широко применяется при изучении процессов и предметов материального мира. Модель — искусственно созданная система, отображающая некоторые из свойств реального объекта (процесса или машины). Основными типами моделей являются: мысленные (идеальные), математические модели — такие, которые описывают реальный процесс при помощи математических зависимостей и, наконец, физические модели.

В данном учебном пособии на примере моделирования процесса изготовления профильных труб рассмотрены все его этапы: разработка твердотельной и конечно-элементной модели, реализация ее с помощью программного комплекса, анализ результатов и разработка рекомендаций по совершенствованию составляющих процесса профилирования.

Одной из характерных особенностей современного промышленного производства в Российской Федерации, да и в мире в целом, является набирающая силу переориентация технологий в сторону энерго- и ресурсосбережения. Развитие подобных технологий в металлургическом и машиностроительном производстве означает прежде всего экономию топливных и сырьевых ресурсов, а также экономию производимого металла в виде создания металлоэкономных изделий с необходимыми потребительскими свойствами. Приоритетным должно стать повышение эффективности использования ресурсов над увеличением объемов добычи сырья и производства продукции.

Одним из таких изделий, позволяющим максимально полно использовать механические свойства металла, затраченного для их производства, являются трубы экономичных профилей (профильные трубы). Профильными трубами могут быть названы полые изделия большой протяженности, имеющие поперечное сечение, отличное от круглого, или отличную от цилиндрической внутреннюю или наружную поверхность. Кроме того, к этому классу могут быть отнесены круглые конические, ступенчатые и прочие круглые трубы, имеющие продольный профиль (например, винтовой).

Поле применения таких труб в современной технике достаточно широко. В то же время большой эффект от применения таких труб позволяет говорить о том, что расширение поля использования труб со специальным профилем позволит добиться еще более значительного прироста потребительских и эксплуатационных свойств изделий, сконструированных с их применением.

Производство авиационных, транспортных и сельскохозяйственных машин требует использования профильных труб самого разнообразного профиля. Такое использование создает принципиальную возможность создания некоторых конструкций (например, изготовление особо крупных роторов вертолетов требует применения овальных или каплевидных равнопрочных труб переменного по длине сечения), что приводит к значительному снижению веса конструкции и, как следствие, экономии горючего, повышению ресурса машины и другим положительным эффектам.

Вместе с тем, при конструировании ряда ответственных изделий, не имеющих особых требований по соотношению «масса конструкции — ее потребительские свойства», профильные трубы не применяются ввиду их более высокой, по сравнению с обычными трубами, стоимости.

Вариантов решения вопроса о снижении стоимости производства профильных труб несколько. Возможно дальнейшее

развитие технологий, позволяющих получать профильные трубы непосредственно из листовой заготовки, например гнутых и гнуто-сварных профилей. Также имеется возможность совершенствования процессов профилирования труб из круглых трубных заготовок.

Значительные проблемы существуют при проектировании и изготовлении профилировочного инструмента, в частности отмечается недостаточная точность производимых профильных труб, что в первую очередь может быть обусловлено несовершенством методики проектирования инструмента. Кроме того, в ряде случаев имеет место его недостаточная стойкость.

Решение этого ряда проблем требует всестороннего исследования как технологии производства, так и процесса профилирования, с точки зрения конкретных рекомендаций по их совершенствованию, повышению выхода годного, снижению расхода материала на производство инструмента.

В данной работе из всего многообразия профильных труб рассмотрены те из них, которые производятся волочением из круглой заготовки в профильных волоках, а также некоторые вопросы теории профилирования труб, полученных формовкой из листа.

Имеющиеся в настоящее время теоретические и экспериментальные исследования касаются в основном изучения влияния параметров процесса на усилие профилирования. Имеются лишь отдельные исследования, посвященные вопросам калибровки инструмента. Разработка технологии производится часто на основе эмпирических зависимостей и накопленного производственного опыта.

Задачи определения рациональной формы волочильного канала, давления металла на инструмент, формоизменения при профилировании, напряженно-деформированного состояния и степени использования запаса пластичности металла для тянутых труб практически не исследованы. Не изучены вопросы определения пластичности металла для формования из листа

труб при наложении тангенциального подпора или растяжения в калибре.

Эти вопросы изучены в представленной работе.

Пособие рекомендуется использовать при изучении курсов: «Математическое моделирование технологических процессов», «Программное обеспечение САПР», «Пакеты прикладных программ», а также в курсовом проектировании и при выполнении выпускной квалификационной работы бакалаврами по направлению «Технологические машины и оборудование».



# 1. Оборудование для производства профильных труб. Методы теоретического исследования процесса

---

## 1.1. Сортамент профильных труб

---

**И**спользование тех или иных видов профильных труб обусловлено областью и технологическими особенностями процесса их применения, а также конструкцией узла или машины, где они применяются. В этой связи большинство видов профильных труб имеют свое, достаточно специальное, назначение.

Профильные трубы условно могут быть разделены на три основные группы:

1. Трубы с профильным поперечным сечением, не изменяющимся по длине.
2. Трубы с профильным (переменным) продольным сечением.
3. Трубы сложной продольной конфигурации (например, углы, отводы, полые валы и др.).

Последние две группы профильных труб хоть и достаточно распространены, но применение их узко специализировано и, в этой связи, они редко производятся крупными партиями. Поэтому в дальнейшем рассмотрим подробнее трубы, имеющие профильное поперечное сечение, не изменяющееся по длине.

На данный момент может быть произведено несколько десятков типов профиля поперечного сечения трубы. По существовавшим ГОСТам и техническим условиям изготавливаются восьмигранные трубы с высотой профиля от 12 до 40 мм и толщиной стенки от 1 до 3,5 мм, восьмигранные трубы с круглым отверстием, двухканальные трубы (двух типов: *A* — в виде «восьмерки», *B* — с плоской центральной частью), с вогнутым или выпуклым желобком на одной из стенок (диаметром от 32 до 73 мм), а кроме того, звездообразные трубы. ГОСТ предусматривал большой сортамент каплевидных труб (высота профиля от 12 до 120 мм с толщиной стенки 1–2 мм), в том числе с несколькими видами поперечного сечения. Сортамент квадратных труб охватывал высоту профиля поперечного сечения трубы от 12 до 110 мм с толщиной стенки от 0,8 до 9 мм, прямоугольных — от 10 до 180 мм (по большей высоте профиля) со стенкой 0,8–12 мм, овальных — с высотой профиля от 6×3 мм до 90×30 мм при толщине стенки от 0,5 до 2,5 мм.

В отдельный вид могут быть выделены несколько подвидов плоскоовальных труб с большей высотой профиля: по ГОСТ от 13,5 до 50 мм и толщиной стенки 1–2,5 мм.

Применяются также трубы с крестообразным профилем и ребристые, имеющие достаточно разнообразные конфигурации. Сортамент шестигранных труб, а также шестигранных с круглым отверстием, так называемого «гаечного» профиля, по ГОСТ ограничен высотой трубного профиля от 9 до 75 мм (толщина стенки от 1,5 до 6 мм).

Области применения профильных труб также весьма разнообразны. Так, в сельскохозяйственном машиностроении широко применяются квадратные профили со сторонами от 25 до 100 мм и со стенкой толщиной от 3 до 8 мм, прямоугольные размерами от 40×25×3 до 100×50×7 мм, треугольные и др. В горном машиностроении применяются квадратные трубы со сторонами от 32 до 42 мм и со стенкой толщиной от 3 до 6 мм. Квадратные трубы со стороной от 80 до 110 мм и со стенкой толщиной

от 4 до 9 мм служат для крепления шахтных выработок. В коллекторах паровых котлов и теплообменниках применяются толстостенные квадратные и прямоугольные трубы со сторонами от 110 до 152 мм и со стенкой толщиной от 12 до 20 мм. Квадратные и прямоугольные трубы широко применяются в автомобиле-, трактор- и вагоностроении.

В самолетостроении необходимы трубы обтекаемой формы: каплевидные с осями от  $12 \times 6$  до  $120 \times 60$  мм и со стенкой толщиной от 1,0 до 2,5 мм, овальные с осями от  $6 \times 3$  до  $90 \times 30$  мм и со стенкой толщиной от 0,5 до 2,5 мм, а также трапецеидальные с большим основанием размером от 22 до 33,8 мм и со стенкой толщиной от 0,5 до 1,0 мм.

Для мотоциклетной и велосипедной промышленности изготавливаются трубы D-образного профиля размерами от  $15 \times 7,5$  до  $42 \times 18$  мм и со стенкой толщиной от 1,0 до 2,0 мм.

Для стыкования токонесущих проводов линий электропередач применяются плоскоовальные трубы размерами от  $17 \times 8,5$  до  $29,4 \times 13,4$  мм и со стенкой толщиной 1,7 и 2,0 мм. Некоторые виды поперечных сечений наиболее часто применяющихся в промышленности профилей изображены на рис. 1.1.

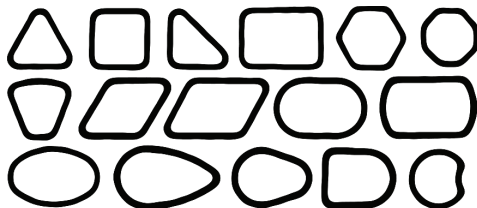


Рис. 1.1. Некоторые виды поперечных сечений профильных труб

Как видно из приведенных примеров, даже для достаточно универсальных профилей труб прослеживается достаточно четкая область применения.

В основном, могут быть установлены отдельные причины, приводящие к необходимости применения профильных труб.

Так, например, использование квадратных (прямоугольных) труб чаще всего обусловлено конструкцией, требующей создания деталей типа плоских рам. Реже применение таких труб имеет место в связи с повышенным моментом сопротивления таких труб при плоском изгибе, наиболее часто имеющем место в несущих конструкциях (фермах и пр.). Известно, что момент сопротивления квадратной трубы плоскому изгибу на 30 % больше равной ей по весу круглой трубы. Применение шестигранных труб с круглым отверстием для производства гаек и резьбовых муфт позволяет добиться значительной экономии металла при практически безотходном производстве. В значительном количестве случаев корпусные детали, ранее изготавливаемые точением и фрезерованием, можно заменить тонкостенными профильными трубами.

В зависимости от формы профиля поперечного сечения труб могут быть предложены несколько признаков классификации таких труб.

1. По симметричности профиля: симметричные относительно одной или нескольких продольных по отношению к трубе плоскостей симметрии; симметричные с поворотной относительно центра степенью симметрии; несимметричные.

2. По степени толстостенности готовой трубы: особотолстостенные (с «игольчатым» отверстием или несколькими отверстиями); толстостенные; тонкостенные; особотонкостенные.

3. По типу стенок трубного профиля: со сплошными стенками, имеющие специальные стенки (с перфорацией, пористые и др.); со стенками, имеющими собственный мелкий профиль (канавки, насечки, выступы и др.).

4. По типу выполнения углов трубного профиля: трубы с плавным профилем (овальные и др.); трубы с нормальным профилем (в пределах стандартов); трубы с малыми и сверхмалыми радиусами закруглений в углах трубного профиля.

5. По профилю стенок: с неизменной толщиной стенок по всему трубному профилю (например, обычные квадратные

трубы); с утолщением (утонением) стенок в характерных участках трубного профиля (например, шестигранные трубы с круглым отверстием).

По наличию или отсутствию продольного или винтового шва (сварного) или открытого (непроваренного) могут различаться трубы, полученные обработкой металла давлением (волочением, прессованием, прокаткой и др.) и свертыванием с последующей сваркой (пайкой) из листовой заготовки.

## **1.2. Способы получения профильных труб**

---

Разработанные способы производства профильных труб разделены на универсальные (как правило, имеющие значительную производительность) и специальные, которые могут обеспечить получение уникальных профилей.

Рассмотрим универсальные способы профилирования подробнее. Подавляющее большинство способов этого класса используют обработку металлов давлением.

Классификация способов профилирования:

1. По типу заготовки: из плоской (штрипса); из сплошной; из трубной (полый).

2. По наличию шва в стенке заготовки: бесшовный способ; способ с применением соединения (например, сварки) стенки; способ со стенкой, имеющей разрыв.

Основными способами получения профильных труб являются:

1. Волочение труб, в том числе:

1.1. По типу оправки — на длинной подвижной оправке; на цилиндрической неподвижной (закрепленной) оправке; на самоустанавливающейся оправке; безоправочное; на пластическом сердечнике.

1.2. По типу волокна — в сплошной волоке (со скольжением); в волоке с выпусками; в роликовой волоке; в шариковой волоке.

1.3. По типу подачи трубы — вытягиванием; заталкиванием.

1.4. По типу движения волокна — на неподвижной волоке; поступательно движущейся волоке; вибрирующей волоке; вращающейся волоке.

2. Различные способы прокатки профильных труб.

3. Разнообразные способы прессования профильных труб.

4. Свертывание и сварка труб из листовой заготовки.

Рассмотрим характерные способы получения профильных труб получивших наиболее широкое распространение подробнее.

Один из наиболее часто применяющихся способов получения профильных труб — способ волочения в профильных волоках (рис. 1.2). Применение оправки в этих случаях ограничено в связи с достаточно сложной ее геометрией, поэтому наиболее часто применяется безоправочное волочение. На волокнах первого прохода (рис. 1.2, *б*) наиболее целесообразно входное отверстие изготавливать круглым, что приводит к снижению износа волокна. При этом известно, что удовлетворительное заполнение формы достигается в том случае, когда периметр исходной трубы на 2—4 % больше периметра готовой профильной трубы, что обусловлено некоторым удлинением трубы в процессе профилирования. Трубы некруглых форм чаще всего получают из круглых трубных заготовок. При этом в зависимости от сложности конечной формы трубы профилирование ведут в 1—3 перехода. Иногда, например в случае необходимости получения некруглой трубы с острыми кромками или внутренней поверхностью высокой чистоты, профилирование ведут на оправке с небольшим уменьшением и периметра, и толщины стенки, что учитывается при назначении размеров заготовки.

Пока надежных обобщений и методов проектирования переходов для профилирования труб не предложено. Поэтому приходится проектировать такие переходы на основании общих положений, применяемых при проектировании переходов для круглых труб, а также использования опыта аналогичных разработок и некоторых установившихся частных положений.

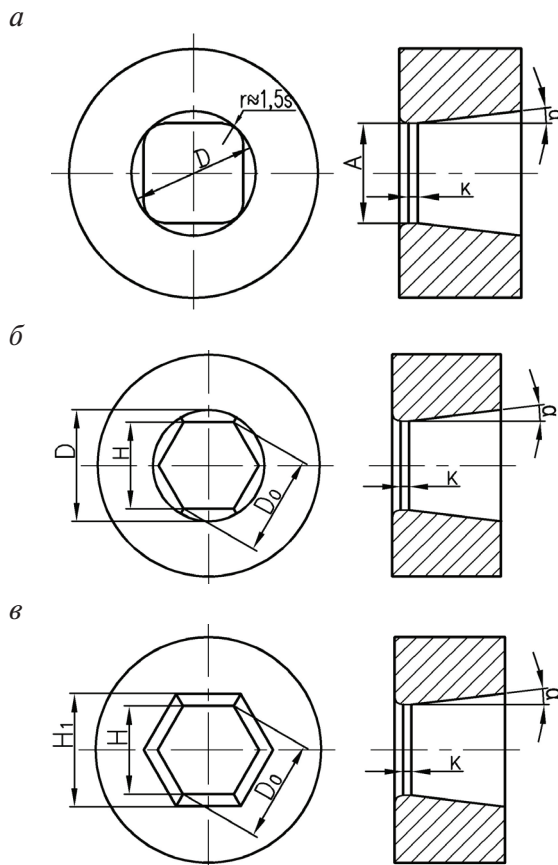


Рис. 1.2. Калибровка волок для профилирования труб:

*а* — квадратных; *б* — шестигранных при безоправочном волочении;

*в* — шестигранных при оправочном волочении

Волочение труб некоторых простых профилей возможно на профильных оправках, что позволяет, кроме собственно профилирования, достигать еще и значительных величин удлинения трубы. Основные способы, использующиеся в этом случае, те же, что и при волочении обычных цилиндрических труб. Ис-

пользуется волочение труб на длинной подвижной оправке, при котором оправка (представляющая собой длинный цилиндр) перемещается через волоку вместе с профилируемой трубой; волочение на удерживаемой оправке, когда оправка (в виде цилиндра) удерживается в очаге деформации при помощи оправкодержателя, а также волочение на самоустанавливающейся оправке, при котором оправка удерживается в зоне волочения силами трения между трубой и самой оправкой.

Известно, что возможности холодного волочения при производстве тонкостенных труб ограничиваются прочностью на разрыв протягиваемой трубы. Прочность протянутой части трубы должна быть достаточной, чтобы преодолеть сопротивление трубы пластической деформации и силы трения между поверхностями трубы и инструмента. При одном и том же диаметре трубы и при одинаковых относительных вытяжках сопротивление деформации уменьшается примерно пропорционально уменьшению толщины стенки трубы, а величина трущихся поверхностей и давлений на них (это относится главным образом к калибрующему пояску кольца) при этом остается в некоторых пределах постоянной, т.е. сила трения не уменьшается. Поэтому при некоторой толщине стенки трубы создается положение, когда прочность трубы недостаточна для выполнения процесса деформации.

Положение усложняется еще и тем, что при малых абсолютных обжатиях стенки трубы незначительные отклонения фактических размеров волочильного инструмента от его номинальных размеров весьма существенно изменяют величину относительного обжатия. Если такое изменение направлено в сторону увеличения, то это ведет к обрыву трубы. Именно этим обстоятельством объясняются частые обрывы тонкостенных труб при волочении. Кроме того, тонкостенные трубы более чувствительны к качеству подготовки их поверхности перед волочением.

Все это привело к тому, что волочением стальные трубы изготавливают со стенками не менее 0,5–0,6 мм. Трубы из цветных



металлов, благодаря их большей пластичности и меньшему коэффициенту трения, могут быть получены и с более тонкими стенками.

Достаточно широко распространен метод получения профильных труб гибкой и сваркой (чаще всего электрической) трубного профиля из листовых (полосовых) заготовок — штрипсов. Этим способом получают, преимущественно, трубы простых геометрических профилей, например квадратные, прямоугольные, треугольные, овальные. Кроме того, этим способом может производиться значительный сортамент профилей сложной формы, использующихся для строительных, отделочных работ и различных видов машиностроения. Характерной особенностью этих профилей является малая относительная толстостенность и возможность получения отдельных элементов профиля с сильной вытянутостью наружу или вогнутостью внутрь.

В некоторых случаях, например, когда от профиля не требуется повышенная жесткость или профиль не является закрытым, сварка может быть исключена, т. е. процесс профилирования завершен просто сведением концов сечения профиля.

### **Достоинства и недостатки различных способов получения профильных труб**

Для большинства описанных способов достоинства и недостатки определяются возможностью или невозможностью получения конкретным способом тех или иных видов продукции, а также стоимостью осуществления процесса, однако можно выделить ряд недостатков, присущих конкретным способам.

В основном, способы, использующие волочение, предъявляют повышенные требования к точности наружного диаметра (а в случае оправочного волочения и к толстостенности) трубы — заготовки, что связано с возможным появлением неточ-

ности профиля. Кроме того, для безоправочного волочения характерно возникновение разностенности профиля (в особенности при волочении несимметричных профилей) и потеря стеной устойчивости, что выражается в возникновении волнотности стенок профиля.

Способы, использующие прокатку, как правило, не позволяют получать профиль высокой точности, что обусловлено появлением рисок и закатов, а также других дефектов, присущих профильной прокатке.

Способы, связанные с прессованием, как правило, имеют высокую энергоемкость процесса, а также присущее этому виду обработки давлением явление образования пресс-остатка, что приводит к снижению выхода годного.

Применение способов, использующих свертывание и сварку трубного профиля из листовой заготовки, включает в себе проблему, связанную с образованием сварного шва, что может быть критичным при получении точных профилей.

Преимущества большинства видов производства могут проявиться в возможности получения крупных серий профильных труб, либо профилей высокой точности.

Для способов, использующих волочение, характерна сравнительная простота технологии, низкая стоимость инструмента, принципиальная возможность обеспечения высокой точности готовых изделий, достаточно большой сортament изделий.

Для способов, использующих прокатку, характерна высокая производительность, массовость производства, а при условии соблюдения технологических требований и высокая стабильность качества продукции. Способы холодной прокатки на практике показывают высокую пригодность для изготовления профилей со сложной внутренней поверхностью (например, круглых труб с шестигранным отверстием).

Способы, связанные с прессованием, на практике позволяют получить значительные вытяжки, хорошую структуру ме-

талла, а также широкий сортамент готовой продукции при условии наличия значительного количества видов инструмента.

Способы, включающие формовку профиля из листовой заготовки с последующей сваркой, позволяют, на данный момент, получать значительный сортамент изделий с различной конфигурацией сечения, а также сильно различающихся размеров и толстостенности. При этом возможно изготовление изделий со сложной фактурой стенки, которые не могут быть получены прокаткой, волочением или прессованием (например, трубы с внутренним кольцевым оребрением, внутреннюю поверхность которых профилируют до свертывания и сварки).

Можно получать сварные гнутые профили из стали повышенной прочности, в частности (рис. 1.3) из стали Ст5пс (а), 09Г2Т (б), 15ХСНД (в), а также других профилей из сталей Ст3пс, Ст3кп, 12Х2ГМФ, 09Г2Т. Процесс профилирования подобных изделий требует предварительного подогрева, после чего осуществляется профилирование, а затем сварка. Скорость профилирования колеблется от 15 до 25 м/мин.

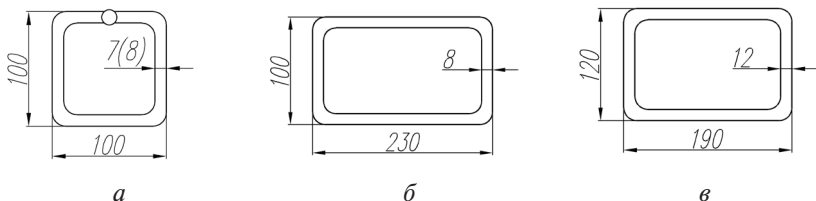


Рис. 1.3. Сварные гнутые профили прямоугольного сечения из стали повышенной прочности

Отдельно названы способы мелкосерийного трубопрофильного производства, которые используют в качестве рабочего тела жидкость (она применяется в качестве оправки для получения трубчатых деталей типа пространственных рам, отводов, угольников и т. п.), а также упругие (эластичные) элементы, гибкие инструменты — канаты.

## **1.3. Оборудование для профилирования труб**

---

### **1.3.1. Оборудование для волочения труб**

В качестве оборудования для производства профильных труб волочением обычно используют универсальные волочильные станы, выполняющие процесс профилирования на основе приложения технологического усилия к переднему концу трубы. В литературе не описаны конструкции оборудования и промышленные технологии профилирования труб путем проталкивания, проталкивания с подпором или волочения с противонапряжением. Кроме того, применение поточных линий для профилирования труб из бухты в литературе не приводится.

### **1.3.2. Оборудование для производства профильных труб формовкой из листа**

В России и за рубежом имеется опыт производства замкнутых профилей, например сваркой методом сопротивления. На рис. 1.4. для примера показана схема расположения технологического оборудования агрегата для производства профилей французской фирмы «Сомес». Агрегат предназначен для изготовления гнутых сварных профилей прямоугольной и корытной форм с толщиной заготовки 0,8–4,5 мм и шириной до 500 мм, при скорости сварки 10–80 м/мин в зависимости от требуемой толщины готового профиля.

Агрегат состоит из трех участков: а) подготовительного (головной части); б) профилегибочного стана со сваркой и калибрующей группой клетей; в) хвостовой части.

На подготовительном участке агрегата производится подача рулонов, сварка концов полос и намотка на двухпозицион-

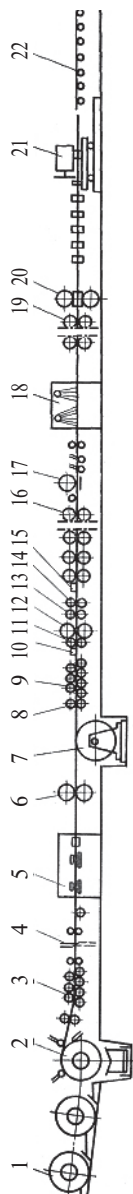


Рис. 1.4. Стан для производства гнутых сварных профилей: 1 — загрузочная площадка; 2 — разматыватель; 3 — правильная машина; 4 — ножницы с верхним резом; 5 — стыкосварочная машина с гратосни-мателем; 6 — задающие ролики; 7 — моталка-накопитель; 8 — задающие ролики правильной машины; 9 — правильная машина; 10 — дисковые ножицы для подрезки кромок; 11 — вводной направляющий стол; 12 — задающие ролики; 13 — тянущие ролики; 14 — кромкокрошитель для обрезанной кромки; 15 — приемный стол профилигоночного агрегата; 16 — профилигоночный агрегат; 17 — сварочная машина; 18 — система охлаждения сварного шва; 19 — калибровочные валки; 20 — отводной рольганг; 21 — дисковая пила; 22 — отводной рольганг

ную моталку-накопитель. Моталка-накопитель служит одновременно и разматывателем. Пока проводится намотка полосы на барабан накопителя, одновременно происходит разматывание полосы и подача ее в профилегибочный стан.

Установка промежуточного накопителя предусмотрена вместо петлевика, чтобы профилегибочный стан работал определенное время без остановки. Технологический процесс на агрегате начинается с подачи мостовым краном полосы в рулонах со склада заготовок на загрузочную площадку. Один рулон загружается в приводной разматыватель с отгибателем переднего конца полосы, откуда полоса поступает в правильную машину. Для создания бесконечного процесса профилирования передний и задний концы полосы рулона обрезаются на ножницах и свариваются на стыкосварочной машине с зачисткой сварного шва гратоснимателем.

После выхода из стыкосварочной машины полоса при помощи приводных задающих роликов движется на поворотную двухпозиционную моталку-накопитель. Во время накопления полосы на моталке, одновременно работает разматыватель. От поворотного накопителя полоса направляется в задающие ролики второй правильной машины.

После правки полоса поступает на дисковые ножницы для обрезки кромок полос. Горизонтальные и вертикальные холостые ролики и направляющие линейки точно направляют полосу в дисковые ножницы.

Приемный стол профилегибочного стана с вертикальными роликами установлен для направления полосы в первую пару рабочих валков. Каждый роликoderержатель может быть передвинут в горизонтальном направлении вдоль оси рабочих валков при помощи двух установочных винтов.

Положение роликoderержателя регулируется в зависимости от ширины полосы.

Профилегибочный стан состоит из 12 рабочих и шестеренных клетей, промежуточных вертикальных роликов и приво-

да. Нажимными винтами вручную регулируют уровень установки верхних валков.

Привод каждой пары нажимных винтов синхронизирован и производится от одного штурвала. Верхний валок не имеет уравнивающего устройства. Подъем его производится нажимным винтом, соединенным с подушкой. Нижний валок регулируется в вертикальной плоскости при помощи нижних установочных болтов и гаек (рис. 1.5).

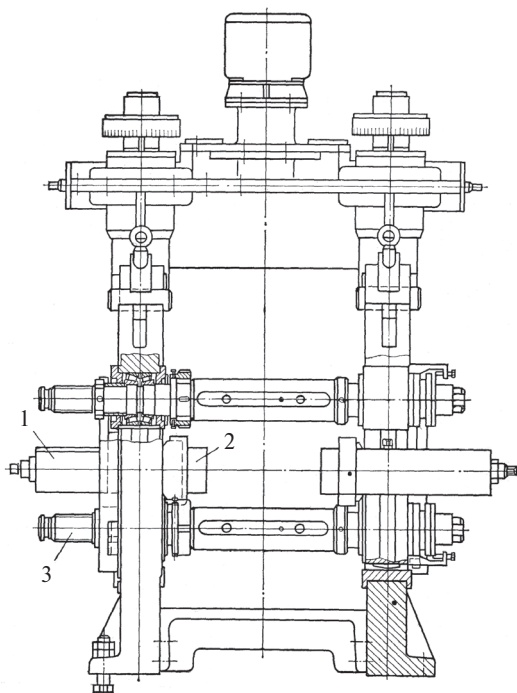
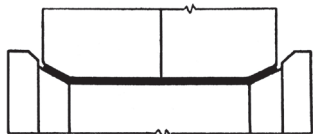


Рис. 1.5. Универсальная клеть профилегибочного стана:

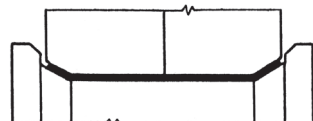
1 — кассета; 2 — вертикальные холостые валки; 3 — приводные валки

Схема процесса формовки квадратной трубы из листа приведена на рис. 1.6.

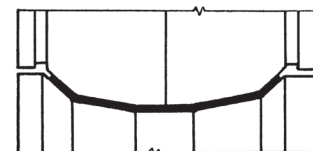
Клеть I



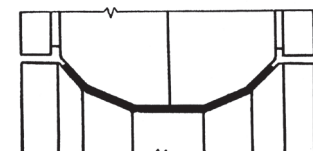
II



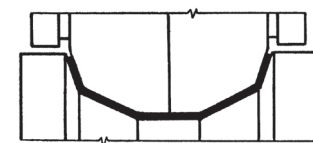
III



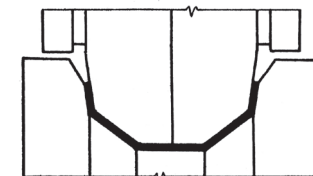
IV



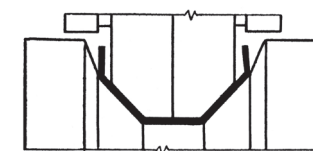
V



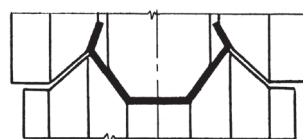
VI



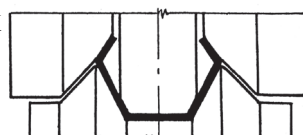
VII



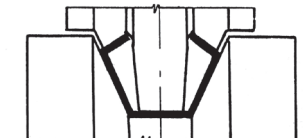
VIII



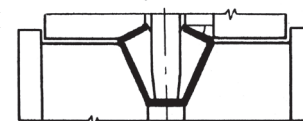
IX



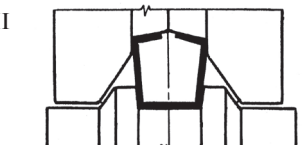
X



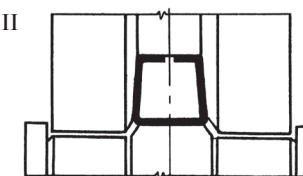
XI



XII



XIII



XIV

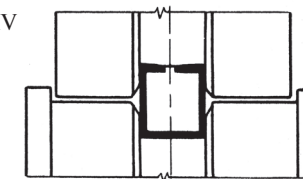


Рис. 1.6. Схема формовки квадратной трубы из листа



После формовки профиль поступает в сварочную машину для сварки методом сопротивления с системой охлаждения шва. Остывший профиль поступает в калибровочные валки с приводными промежуточными вертикальными холостыми роликами. В калибрующих валках профили по поперечному сечению доводятся до нужных размеров.

Для правки готового профиля на выходе калибровочного стана установлена турголовка. Готовые профили разрезаются на ходу дисковой пилой на штанги необходимой длины. Разрезанные профили по отводному рольгангу поступают в карман, где упаковываются и отправляются мостовым краном на склад готовой продукции.

#### **1.4. Требования к качеству, виды брака**

---

Изучение видов брака при производстве профильных труб, причин возникновения и способов его устранения необходимо производить при анализе результатов теоретического исследования, разработке рекомендаций по совершенствованию этого процесса и нового оборудования, на котором он осуществляется.

На данный момент требования к геометрическим размерам и качеству профильных труб определяются несколькими стандартами, однако для большого количества типов выпускаемых профилей таких стандартов нет. Кроме того, требования могут быть установлены техническими условиями.

В большинстве случаев профили геометрически подобно поперечного сечения объединяются в группы, что позволяет вводить стандартные геометрические размеры в виде таблиц параметров.

В литературе зачастую упоминается ряд ГОСТов 1957 и 1968 гг. и частично 1982 и 1986 гг. на большое количество ти-

пов профильных труб. На настоящий момент некоторые стандарты утратили силу и изготовление профильных труб (в том числе простых геометрических профилей) производится в соответствии с техническими условиями или по взаимному соглашению с покупателем. В настоящее время технические требования на некоторые виды профильных труб изложены в ГОСТ 13663–86 и ГОСТ 8639–82.

В большинстве случаев старые требования к точности и геометрическим размерам труб сохраняются или точность даже снижена, поэтому соблюдение требований старых ГОСТ не является нарушением большинства современных технических условий. Например, в ГОСТ 8639–82 оговариваются следующие требования:

1. По длине горячекатаные трубы могут заказываться до 12,5 м, холодноотянутые и электросварные — до 9 м.

2. По наружным размерам допускаются следующие отклонения: для горячекатаных труб —  $\pm 1,5\%$ ; для холодноотянутых и электросварных размером до 30 мм —  $\pm 0,3\%$ ; до 50 мм —  $\pm 0,4\%$ ; свыше 50 мм —  $\pm 0,8\%$ .

3. По толщине стенки горячекатаных труб допуск составляет:  $+12,5 - 15,0\%$ ; электросварных неволоченых —  $\pm 10\%$ ; холодноотянутых (бесшовных и электросварных) —  $\pm 12,5\%$ .

4. Разностенность не должна выводить стенку трубы за пределы допускаемых отклонений по толщине.

5. Вогнутость (утяжка) сторон не должна превышать для стороны горячекатаных труб размером: до 50 мм — 0,75 мм; до 75 мм — 1,00 мм; до 100 мм — 1,50 мм; свыше 100 мм — 2,00 мм; для стороны холодноотянутых и электросварных труб размером до 50 мм — 0,50 мм; до 75 мм — 0,75 мм; свыше 75 мм — 1,00 мм.

6. Радиус скругления углов профиля принимается примерно равным полуторной толщине стенки.

7. Наибольшая кривизна труб допускается до 2 мм на 1 пог. м.

Требования к виду и качеству поверхности труб, к химическому составу металла и его механическим свойствам предъ-

являются по соответствующим стандартам на трубы круглого сечения.

Рассмотрим подробнее основные виды брака, возникающего при получении профильных труб. Существующие стандарты не предусматривают иных, специфических видов брака профильных труб в отличие от круглых.

Основным видом брака профильных труб является брак по геометрическим размерам (искажения профиля) и по состоянию поверхности.

Чаще всего встречаются следующие искажения профиля: отклонение от установленных допусков по размерам; искажения профиля поперечного сечения, толщина стенки, не укладывающаяся в допуск, превышение допуска по утяжке граней, недостаточное заполнение углов профиля и превышение допустимой кривизны профиля.

Основными причинами отклонения от допусков по размерам холоднотянутых профилей могут быть: износ инструмента (положительное отклонение) или неправильное его изготовление (положительное или отрицательное отклонение). Довольно часто встречается такая погрешность, как незаполнение профиля. Это относится к профилям, размер которых установлен по выступающим частям профиля: треугольным, ромбическим, овальным, плоскоовальным и другим. Незаполнение профиля связано с неправильно рассчитанным диаметром исходной трубы, неправильно изготовленным инструментом, его износом.

В случае безоправочного волочения зачастую возникает неравномерность в утолщении стенки, что происходит из-за различных видов деформации и величин напряжений в процессе. Как правило, наибольшее утолщение имеет место в углах профиля; наименьшее утолщение приходится на участок между зоной изгиба стенки и ее распрямления; промежуточное положение по утолщению занимает середина грани. В этой связи технические условия разрешают не контролировать толщину стенки в углах профиля.

Чрезмерная утяжка граней профиля, наблюдаемая как при холодном волочении, так и при горячей прокатке, возникает при слишком большом угле конусности волокна, неправильно спроектированном или изготовленном инструменте (кольца, валки), превышении естественной вытяжки, значительном износе инструмента. Для тонкостенных труб склонность к утяжке выше.

В большинстве случаев трубы неправильного профиля исправляют раздачей на профильной оправке, а для квадратных, треугольных труб — на круглой.

Незаполнение углов профиля может возникать вследствие использования безоправочного волочения вместо оправочного или недостаточной величины периметра исходной трубы. Известно, что должно соблюдаться следующее условие: периметр калибрующей зоны волокна должен быть равен уменьшенному на 3–5 % периметру исходной трубы.

Для овальных труб имеет место утяжка профиля, так как малая ось эллипса овальной трубы получается меньше малой оси калибрующего пояска. Особенно сильно этот эффект проявляется для толстостенных труб. На тонкостенных трубах наблюдается обратное явление: малая ось овальной трубы больше малой оси калибрующего пояска, что объясняется упругостью трубы. Таким образом, существуют значения толщины стенки овальной трубы, при которой деформация утяжки компенсируется упругостью трубы. Следовательно, в этом случае большое значение имеют упругопластические свойства трубы.

На практике прибегают к тому, что уменьшают против номинальной малую ось калибрующего пояска для протяжки тонкостенных труб и увеличивают — для толстостенных. Величина изменения размеров на производстве устанавливается опытным путем. При этом необходимо иметь в виду, что разность между осями пояска и трубы зависит также от разности в периметрах исходной трубы и калибрующего пояска. При увеличении последней разность осей будет уменьшаться, однако с повышением

ем давлений ухудшение условий трения может приводить к появлению рисок на дугах малых радиусов.

Кривизна профильных труб с шагом, меньшим, чем расстояния между опорами или роликами правильной машины, взятыми по одну сторону от оси трубы, не исправляется в процессе правки. Поэтому при волочении необходимо стремиться к тому, чтобы не появлялась волнистая кривизна труб, которая наблюдается при большой винтовой разностенности и при разносторонней волнистой кривизне исходных труб. Вследствие малой деформации профильных труб кривизна перед протяжкой повторяется в уменьшенном масштабе после протяжки. Поэтому сильно искривленные трубы перед профилированием следует править.

Величина остающейся кривизны зависит также и от калибровки очага деформации. Известным способом уменьшения кривизны труб служит протяжка через два кольца. При профилировании труб заднее (второе) кольцо ставят круглое, обеспечивающее посадку трубы по диаметру на 0,5–1,0 мм, что учитывается при определении диаметра исходной трубы.

Отдельный класс дефектов труб составляют поверхностные дефекты. К ним относятся риски, насечка, трещины.

Риски на поверхности холоднотянутых труб возникают в результате местного налипания металла трубы на поверхность инструмента. Причиной этого может быть плохая подготовка труб к волочению (остатки окалины на поверхности труб, недостаточное омеднение или фосфатирование, плохая смазка), некачественная подбивка головок, низкая твердость инструмента, завышенный периметр исходной трубы.

Некачественная подбивка заходных головок может выражаться в резком переходе от забитого конца к трубе, в острых углах на переходном конусе (отпечатки переднего края штампов), в выступающих складках. Все эти отклонения от правильной формы головки приводят к чрезмерным местным удельным давлениям, нарушающим целостность смазочной пленки,

и к налипанию металла на рабочую поверхность кольца. Свидетельством некачественной подбивки головок является образование риски от головки трубы.

Профилирование труб имеет существенное отличие от протяжки круглых труб в том, что на различных участках контактной поверхности очка с трубой создаются удельные давления разной величины. Они достигают наибольшей величины на участках, близких к сопрягающим дугам профиля. Удельные давления значительно повышаются при переполнении формы, что увеличивает возможность образования рисков. Кроме того, причиной образования рисков может быть неправильный выбор смазки или низкая твердость инструмента.

Риски также могут возникать при контакте трубы с плохо обработанными проводками, направляющими, тяговым барабаном.

Трубы переменного сечения со ступенчатым изменением наружного диаметра, получаемые холодным волочением, могут иметь отклонения в длине цилиндрических участков, превышающие установленный допуск. Эти отклонения могут быть в результате неправильной установки приспособления для выключения тележки, недопустимой величины отклонений в диаметре трубы на предыдущем проходе, неверного расчета коэффициента вытяжки. Для труб, имеющих значительную (50–100 мм) величину конических переходов, необходимо также учитывать вытяжку трубы и на этих переходах.

Некоторые заказчики профильных труб требуют исключительной чистоты поверхности труб. Это требование может быть выдержано лишь при условии тщательного наблюдения за состоянием инструмента, качеством поверхности исходных труб, а также транспортировкой, хранением и отправкой труб.

Проведенный анализ показал, что в настоящее время изготовление профильных труб проводят, в основном, тремя способами: протягиванием круглой или профильной трубы через профильную волоку, предварительной формовкой листа в за-

крытый профиль с последующей сваркой и, наконец, профилированием круглых сварных или бесшовных труб путем прокатки в двух- или многовалковых калибрах. Существующие работы, в которых рассмотрены вопросы калибровки валков, технология прокатки профильных труб, предложены схемы реализации этого процесса и технологии их производства, не могут быть в полной мере использованы при создании профилировки инструмента для волочения профильных труб в связи с известными отличиями этого процесса от описанных выше. Одно из этих отличий заключается в том, что если при продольной прокатке необходимо профилировать выходное сечение калибра, то при разработке волочильного канала необходимо профилировать его как в поперечном, так и в продольном сечениях, исходя из тех или иных критериев.

Таким образом, дальнейшее расширение сортамента и повышение качества профилей по двум первым способам производства должно проводиться на основе углубленных теоретических и экспериментальных исследований, разработки специализированного оборудования.

### **1.5. Существующие методы теоретического исследования параметров очага деформации при профилировании труб**

---

К параметрам очага деформации, которые необходимо находить в результате теоретического и экспериментального исследования с целью рационального построения технологического процесса, выбора параметров технологического инструмента и оборудования, а также прогнозирования качества изделий, следует отнести такие, как напряжения (в деформируемом металле и на контактной поверхности), энергосиловые показатели процесса, гидростатическое давление, деформации, в некоторых случаях перемещения точек наружной поверхности (фор-

моизменение), а также предельные деформации, которые могут быть получены без разрушения.

Имея в виду сказанное, рассмотрим для случаев волочения профилей из круглой трубы и профилирования труб из листа существующее состояние теоретических исследований.

### 1.5.1. Волочение

Для определения энергосиловых параметров процесса волочения профильных труб (рис. 1.7) к настоящему моменту известно большое количество методов как «инженерных»,

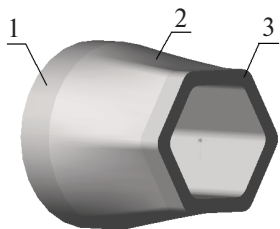


Рис. 1.7. Схема процесса профилирования шестигранной трубы:

1 — участок исходного трубного профиля; 2 — зона профилирования; 3 — готовая шестигранная труба

имеющих поле применимости только для достаточно узких диапазонов типо- и профилеразмеров труб, так и обобщенных, построенных на исследовании процесса профилирования с точки зрения действующих сил контактного трения и внутреннего сопротивления.

Так, например, метод, предложенный и описанный В.Л. Колмогоровым, предлагает определение энергосиловых параметров процесса волочения на основе работы внутренних сопротивлений в процессе в виде суммы двух величин: работы обжатия по периметру и работы формовки без обжатия периметра.

Работа, затраченная на обжатие периметра:

$$A_1 = \left[ 1,86\tau_s \frac{\Delta p}{p} + 1,73 \operatorname{tg} \varphi \left( \frac{\Delta p}{p} \right)^2 \right] V, \quad (1.1)$$



где  $\frac{\Delta p}{p}$  — относительное обжатие периметра;  $\operatorname{tg} \varphi$  — тангенс угла наклона прямой линейного упрочнения материала;  $V$  — объем очага деформации.

Работа внутренних сопротивлений при «чистом» профилировании:

$$A_2 = Lsp \sum_{i=1}^n \left[ 0,288\sigma_s \Delta k_i s + 0,5 \operatorname{tg} \varphi \frac{\sqrt{r_n r_b}}{s} (\Delta k_i)^2 \left( r_n^2 - 4,6 r_n r_b \lg \frac{r_n}{r_b} - r_b^2 \right) \right] d_i, \quad (1.2)$$

где  $L$  — длина трубы;  $r_n$ ,  $r_b$  — наружный и внутренний радиусы трубы;  $\Delta k_i$  — изменение кривизны средней линии при формовке;  $d_i$  — периметр по средней линии на участке изгиба  $i$ ;  $s$  и  $p$  — толщина стенки и периметр средней линии до деформации.

Работа сил контактного трения

$$A_3 = \mu \sigma_s 2\pi s l_{cp} L_1, \quad (1.3)$$

где  $L_1$  — длина трубы после профилирования;  $\mu$  — коэффициент трения;  $l_{cp}$  — средняя длина очага деформации.

Предполагая, что при профилировании трубы происходит искривление поперечного сечения трубы при постоянной длине средней линии сечения, и учитывая условие несжимаемости, а также предполагая, что полная работа волочения профильной трубы складывается из полной работы сил трения, работы внутренних сопротивлений и работы на обжатие периметра, получено тяговое усилие профилирования:

$$P = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{L_1}. \quad (1.4)$$

Методика определения напряжения волочения при профилировании, а также тягового усилия, разработанная И. Л. Перлиным, предполагает неизменной толщину стенки трубы и площадь ее поперечного сечения. Энергия профилирования

расходуется на изменение кривизны всех участков поперечных сечений трубы, взаимно уничтожающиеся изгибы у входа в деформационную зону и выхода из нее, а также преодоление сил контактного трения. Расчет расхода энергии на изменение кривизны поперечного сечения производится на модели, описывающей свертывание плоской ленты в рулон (наматывание на барабан).

Усилие деформации, определенное через работу такого свертывания:

$$P = 0,28at^2 S_T \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right), \quad (1.5)$$

где  $a$  — длина изгибаемой ленты;  $S_T$  — ее сопротивление деформации;  $r_1$  — начальный радиус кривизны;  $r_2$  — конечный радиус кривизны;  $t$  — толщина ленты (стенки трубы).

Напряжение волочения при профилировании:

$$K_{\text{проф}} = (1 + cf_n) 0,28 \frac{t}{\sum a} S_i \sum a \left| \frac{1}{r_{a_k}} - \frac{1}{r_{a_n}} \right|, \quad (1.6)$$

где  $r_{a_k}$  и  $r_{a_n}$  — конечный и начальный радиусы закругления профиля;  $f_n$  — коэффициент трения.

Таким образом, отражается влияние толщины стенки профилируемой трубы, разности между кривизной участков трубы до и после деформации, периметра средней линии поперечного сечения, контактного трения.

Методика определения энергосиловых параметров процесса, разработанная А. К. Шуруповым и М. А. Фрейбергом, предполагает, что тяговое усилие, приложенное к трубе, расходуется на чистое формоизменение трубы в требуемый профиль, знакопеременную деформацию в поперечном сечении трубы, знакопеременную деформацию в продольном сечении трубы, вытяжку трубы, утолщение стенки, преодоление внешнего трения.

Работа формоизменения трубы (чистого формоизменения профиля) определяется в предположении изменения длин отдельных волокон материала при изгибе элементарной пластинки материала трубы. Выражение для определения работы формоизменения имеет вид

$$A_{\Phi} = \frac{l s^2 \psi \sigma_c}{4}, \quad (1.7)$$

где  $s$  — толщина пластинки;  $\psi$  — угол формоизменения;  $l$  — длина трубы;  $\sigma_c$  — среднее напряжение сопротивления деформации.

Тогда сила формоизменения

$$P_{\Phi} = \frac{s^2 \psi \sigma_c}{4}. \quad (1.8)$$

При этом, выведенная по этой методике величина тягового усилия почти совпадает с формулой И.Л. Перлина. Имеются работы, где рассмотрена калибровка инструмента для получения заданного профиля. Подводя итог, отметим, что если энергосиловые параметры процесса профилирования в волокне достаточно хорошо исследованы и полученные зависимости нашли практическое применение, то такие важные характеристики, как напряженно-деформированное состояние металла, давление на инструмент и вероятность разрушения не изучены, а выбор рациональных параметров инструмента производится в большинстве случаев лишь эмпирическим методом.

### 1.5.2. Формовка профильных труб из листа

Процесс профилирования труб из листов весьма подробно изучен в многочисленной литературе как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. Рассмотрены его технология

и оборудование. Проводится выбор рациональных калибровок инструмента и другие особенности процесса, как например, выбор минимальных радиусов мест изгиба и определение предельно допустимых деформаций при профилировании изгибом. Ниже рассмотрим лишь ту часть исследования, которая касается определения напряженно-деформированного состояния и нахождения предельной пластичности металла.

Процесс формовки профильной трубы из листа может быть представлен с некоторыми допущениями в виде модели чистого изгиба, при этом не учитываются деформации, происходящие в межклетевых промежутках.

Рассматривая чистый изгиб листа (рис. 1.8) при больших деформациях, принято, что деформация листа в направлении, перпендикулярном плоскости изгиба:

$$\varepsilon_z = 0 \quad (1.9)$$

и все сечение находится в пластическом состоянии.

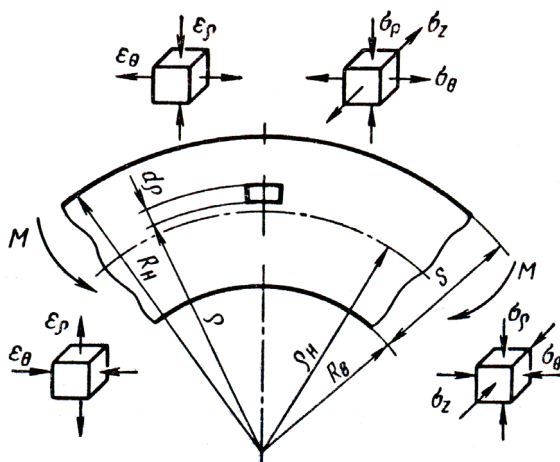


Рис. 1.8. Схема процесса деформации при изготовлении профильных труб

Рассмотрена среда с линейным упрочнением в виде:

$$\sigma_S = \sigma_{S_0} + \Pi \varepsilon_1, \quad (1.10)$$

где  $\sigma_{S_0}$  — исходное значение предела текучести;  $\Pi$  — модуль упрочнения, являющийся тангенсом угла наклона прямой к оси абсцисс;  $\varepsilon_1$  — интенсивность деформации.

Рассматриваются зоны растяжения и сжатия с использованием уравнений равновесия и условия пластичности по Мизесу, а также равенства (1.10) и найдены окружные и радиальные напряжения в обеих выделенных зонах.

Радиус нейтрального сечения, разделяющий эти две зоны, определен в этих работах в виде

$$\rho = \sqrt{R_H R_B}. \quad (1.11)$$

Получен ряд различных зависимостей для определения окружной  $\varepsilon_\theta$  и радиальной  $\varepsilon_r$  деформаций, а также интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  при гибке, например в виде:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[ \frac{2R_H}{R_H + R_B} \frac{S_0}{S} \right], \quad (1.12)$$

где  $S_0$  — исходная толщина полосы;  $S$  — конечная толщина полосы с учетом утонения.

При изгибе полосы на ее растянутой зоне имеет место неблагоприятное сочетание растягивающих напряжений и максимальной деформации. Как показали теоретические и экспериментальные исследования деформированного состояния металла, опасная точка находится на пересечении оси симметрии места изгиба с наружной поверхностью полосы.

Разрушение волокон внутренней поверхности может произойти только в том случае, если интенсивность деформации на этой поверхности по крайней мере в восемь раз больше, чем на наружной. Поскольку такой случай практически исключен,

то наиболее опасны с точки зрения разрушения растянутые волокна наружной поверхности.

При технологических расчетах переходов и создании калибровки инструмента важно знать запас пластичности подката. К. Н. Богоявленский и А. К. Григорьев условие профилирования металла без появления трещин записали в виде:

$$q = \delta_s / \epsilon_H > [q] = 1, \quad (1.13)$$

где  $q$  — запас пластичности металла;  $\delta_s$  — относительное удлинение при испытании на растяжение;  $\epsilon_H$  — максимальная степень деформации нагруженных волокон в месте изгиба.

Следовательно, при расчете запаса пластичности предполагается, что напряженно-деформированные состояния при профилировании и растяжении образца идентичны.

Следует иметь в виду, что в величину относительного удлинения, полученную из опытов на растяжение, кроме устойчивой равномерной пластической деформации, входит также сосредоточенная деформация в шейке. При назначении режимов изгиба пластичность металла следует оценивать по способности к равномерной пластической деформации. Для большинства металлов равномерная деформация составляет 50–55 % общей деформации. Поэтому для практических расчетов вводят еще некоторый поправочный коэффициент, достигающий значения 2.

Из условия появления трещины, Г. А. Смирнов-Аляев предложил формулу для определения относительного радиуса при изгибе:

$$\frac{R_B}{S_0} = \frac{1 - 0,5(1 - \psi)^{-0,47}}{(1 - \psi)^{0,47} - 1}, \quad (1.14)$$

где  $\psi$  — относительное поперечное сужение.

В качестве основных критериев разрушения приняты удельная работа деформации, интенсивность напряжений при разрушении, либо интенсивность деформации. На основе первого

(из указанных) критерия получена формула для интенсивности деформации в месте возможного разрушения:

$$\varepsilon_i = \ln [1/(1 - \psi)]. \quad (1.15)$$

Рассмотренные выше формулы широко применяются в расчетах и дают в сопоставимых условиях надежные результаты.

Вместе с тем, в практике профилирования могут встретиться такие случаи, когда напряженно-деформированное состояние металла существенно отличается от такового при растяжении образцов.

Одним из методов повышения пластичности в местах изгиба при профилировании является наложение растягивающих или сжимающих тангенциальных напряжений (рис. 1.9), применение последних особенно важно для материалов с повышенными механическими свойствами. Сжатие в местах изгиба может быть получено на основе создания соответствующих калибровок валков или быть результатом трения заготовки о валки. Точно так же при изготовлении практически всех гнутых профилей, особенно в первых формующих клетях, силы со стороны валков могут вызывать поперечное растяжение металла.

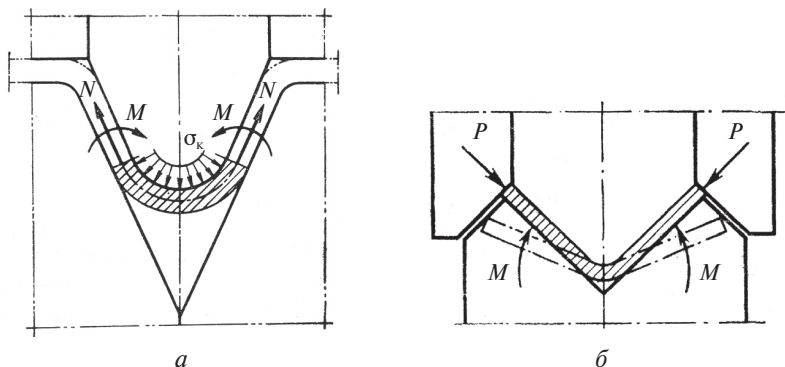


Рис. 1.9. Схемы подгибки с применением тангенциально-направленных сил:

*a* — растяжение, *б* — сжатие

В УкрНИИмете разработаны и опробованы следующие технологические схемы профилирования изделий из сталей повышенной прочности, например из сталей 09 Г2, 30ХГСА:  $a$  — со сжатием,  $b$  — со сжатием и нагревом мест изгиба в последних клетях, где велик наклеп металла,  $b$  — со сжатием и нагревом мест изгиба во всех клетях,  $z$  — с нагревом мест изгиба в последних клетях. По схеме «б» предусматривается изготовление профилей с минимальными радиусами изгиба.

Наличие сжимающих или растягивающих сил вызывает изменение напряженного состояния металла. При этом радиус нейтральной линии будет

$$\rho_H = \sqrt{R_H R_B \exp\left(\frac{\sigma_{\theta} s}{\sigma_s R_H}\right)}. \quad (1.16)$$

Тогда при нахождении первого главного напряжения следует учесть наложение сжимающего напряжения, вызванного приложением тангенциальной силы.

Таким образом, наложение сжимающего или растягивающего напряжения приводит, в сравнении с чистым изгибом, к изменению гидростатического давления.

Применение нагрева мест изгиба является одним из наиболее перспективных направлений в совершенствовании производства гнутых профилей, что позволяет значительно расширить сортамент для материалов с высоким сопротивлением деформаций, а для обычных углеродистых сталей увеличить толщину заготовки на 20–50 %, что предусмотрено характеристикой стана.

Следует также учитывать, что возможны случаи профилирования с приложением вдоль продольной оси изделия натяжения или подпора. Подгиб изделия ведется в несколько переходов, что, как известно, повышает возможную суммарную степень деформации до разрушения.



Наконец, следует учитывать, что местоположение опасной точки при гибке может перемещаться в процессе деформации по ширине полосы (рис. 1.10).

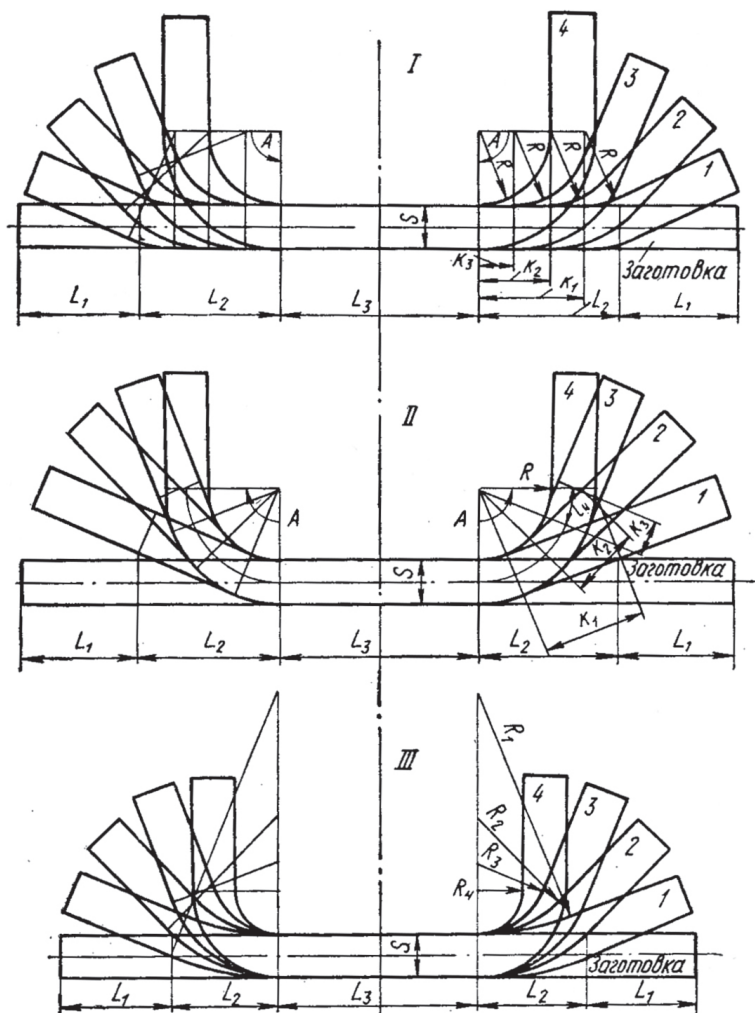


Рис. 1.10. Способы формовки профилей из листа

В частности, указанные на рис. 1.10, схемы формовки гнутых профилей I и II используют гибку по кривой, имеющей постоянный радиус, равный внутреннему радиусу закругления готового профиля, причем в случае I гибка ведется от периферии к центру, а в случае II — от центра к периферии (арабскими цифрами указаны последовательные положения, а стрелками — направления последовательности при гибке). Способ III характеризуется постепенным уменьшением радиуса и приближением его к требуемому внутреннему радиусу закругления готового профиля.

Следовательно, место расположения сечения, в котором деформация имеет максимальное значение, изменяется, а процесс происходит с изменением показателя напряженного состояния  $\sigma/T$ . Это означает, что оценка деформируемости металла должна учитывать эти обстоятельства.

Оценивая деформируемость при гибке листов, Г. А. Смирнов-Аляев указал, что на величину степени деформации до разрушения  $\lambda_p$  в первую очередь влияет схема напряженного состояния, которую рекомендовал оценивать коэффициентом, определяемым по формуле

$$K_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}. \quad (1.17)$$

По данным П. Бриджмена, приведена зависимость  $\lambda_p = f(K_1)$ , причем в области сжимающих напряжений  $\lambda_p$  возрастает, а в области растягивающих напряжений — падает. В этой же работе указано, что при изгибе ожидать начала разрушения следует при значительно меньших степенях деформации, чем при простом растяжении. Заметим, что показатель  $K_1$  отличается от показателя напряженного состояния, предложенного В.Л. Колмогоровым, на величину постоянного множителя.

Суммируя сказанное, можно придти к выводу о необходимости более полного учета условий деформируемости металла

для рассмотренных особых случаев, что может быть выполнено на основе феноменологической теории разрушения.

## **1.6. Постановка задач исследования**

---

Проведенный выше анализ выявил тот факт, что на настоящий момент не существует достаточно адекватных моделей, отражающих процесс получения волочением без оправки профильных труб из гладких трубных заготовок. Существующие инженерные методы зачастую носят приближенный характер и могут быть применены лишь для рассмотрения отдельных классов профильных труб. Кроме того, известные методики расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации не позволяют определять распределение величин, характеризующих это состояние, по толщине стенки (профилю поперечного сечения) трубы.

Существующие способы получения профильных труб позволяют получать трубы с высокой точностью трубного профиля, в том числе с малыми радиусами закругления граней. При изготовлении таких труб на контактной поверхности очага деформации имеют место значительные удельные давления, что может приводить к быстрому износу профилирующего инструмента. Такое положение вещей требует более детального определения картины распределения удельных давлений по зоне контакта трубы и профилировочного инструмента.

Многие области современного машиностроения требуют использования профильных труб, изготовленных из труднодеформируемых материалов, например высокоуглеродистых и легированных сталей, титановых сплавов. Имеющиеся модели процессов волочения практически не позволяют предсказать степень использования ресурса пластичности после одного или нескольких этапов профилирования. Подобный недоста-

ток информации о течении процесса профилирования может приводить к возникновению разрушения труб как при профилировании, так и при дальнейшей эксплуатации труб и монтаже конструкций из них.

Создание технологии производства профильных труб требует проведения параметрического анализа зависимостей энергосиловых параметров от определяющих параметров процесса, в частности требуется определение зависимости усилия профилирования от геометрии очага деформации, свойств материала трубы и условий трения на контакте трубы и инструмента.

Следует также учесть, что создание адекватной модели профилирования путем безоправочного волочения требует проведения серии натурных экспериментов при условии определения усилия профилирования, напряженно-деформированного состояния, изменения геометрии сечений получаемых труб. Проверка соответствия натурных экспериментальных данных и полученных теоретически показывает достигнутую точность модели.

При получении профильных труб методом формовки из листа с наложением растягивающих или сжимающих тангенциальных напряжений следует учитывать при определении предельной пластичности отличие схемы напряженного состояния от схемы чистого растяжения, по которой традиционно принято оценивать пластичность металла.

Все вышеизложенное позволяет сформулировать цели настоящей работы:

1. Разработать новую модель очага деформации при безоправочном волочении профильных труб, которая в полной мере отражает особенности процесса и в то же время носит достаточно универсальный характер. Выдвинуть на этой основе математическую модель очага деформации, учитывающую его геометрию и особенности течения металла.

2. На основе разработанных моделей провести исследования, включающие определение напряженно-деформированного со-

стояния материала трубы в очаге деформации, степень использования ресурса пластичности, энергосиловые параметры процесса и геометрию получаемых волочением труб.

3. Определить распределение удельных давлений по поверхности контакта трубы и профилирующего инструмента и выдвинуть предложения по совершенствованию его формы.

4. Разработать методику расчета степени использования запаса пластичности при формовке профильных труб из листа, учитывающую как деформированное, так и напряженное состояние металла.

5. Провести изучение формы и размеров полученных в результате эксперимента образцов труб с целью установления соответствия экспериментальных данных теоретическим.

6. Провести экспериментальное исследование процессов, имеющих место при натурном моделировании процесса профилирования, а также определение напряженного и деформированного состояния металла трубы на основе замеров ее твердости.

7. Разработать рекомендации по совершенствованию процесса профилирования труб.

8. Разработать предложения по созданию специализированных станков для профилирования труб, использование которых позволило бы расширить технологические возможности этого процесса.

## 2. Разработка моделей процесса получения профильных труб

---

### 2.1. Геометрические модели при волочении и особенности процесса получения многогранных труб

---

**Д**ля получения многогранных профильных труб используется, как правило, круглая трубная заготовка, которая протягивается через волоку, калибрующий поясok которой с точностью до величины упругой деформации трубы соответствует готовым размерам, а продольный профиль рабочего канала обеспечивает преобразование исходного круга в заданный многогранник. При этом возникает объемный очаг деформации, показанный для шестигранных и квадратных труб на рис. 2.1 и 2.2.

Процесс профилирования протекает следующим образом:

1. Входящая в волоку труба с исходным диаметром  $D_0$  и стенкой  $S_0$  испытывает радиальное обжатие, реализующееся в основном на гранях профильной волоки. Такой процесс характеризуется сложной картиной распределения деформации по сечению.

2. Труба, уже вошедшая в рабочий конический участок волоки, оказывает действие на участок трубы, остающийся за его пределами. Такое воздействие выражается в появлении на трубе достаточно протяженных участков внеконтактной деформации, характеризующихся значительными радиусами закругления.

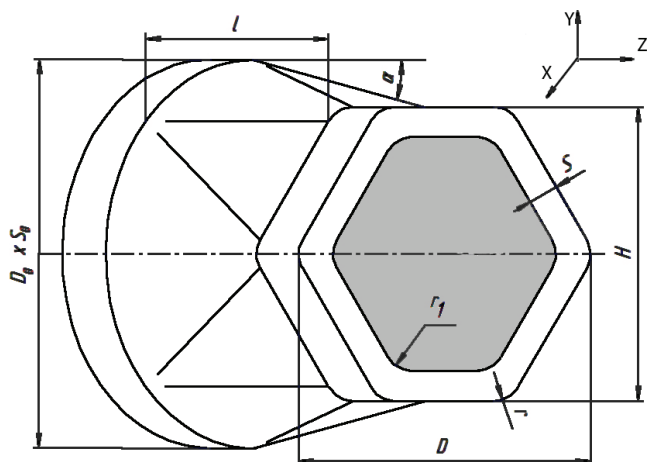


Рис. 2.1. Схема очага деформации при профилировании шестигранных труб волочением:

$l$  — длина очага деформации;  $\alpha$  — угол конусности волоки;  $D_0 \times S_0$  — наружный диаметр и толщина стенки заготовки;  $D$  и  $S$  — диаметр описанной окружности и толщина стенки готовой трубы;  $H$  — размер «под ключ»;  $r$  и  $r_1$  — радиусы скругления ребер готовой трубы

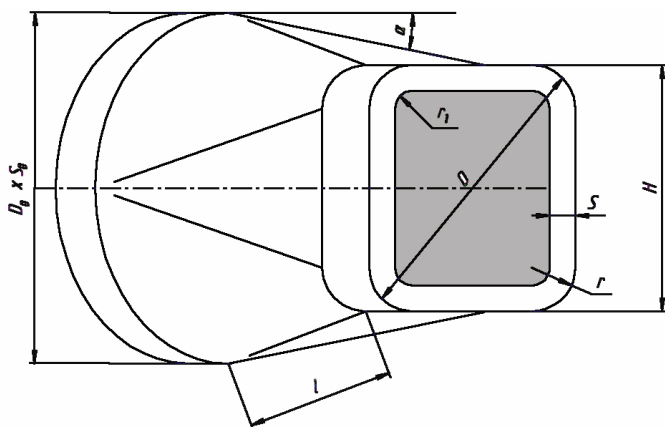


Рис. 2.2. Схема очага деформации при профилировании квадратных труб волочением (см. обозначения как на рис. 2.1)

3. Основной процесс профилирования (рассмотрен на примере получения шестигранной трубы) характеризуется двумя основными видами деформации: ростом радиуса стенки трубы на гранях волокна, приводящим к образованию плоских поверхностей, уменьшением радиусов и образованием углов профиля (ребер).

Эти процессы характеризуются достаточной сложностью картины напряженно-деформированного состояния, что связано с наличием одновременного действия нескольких факторов — подпора по периметру в плоскости, перпендикулярной оси трубы, и возникающего вследствие действия на участки формирования углов профиля со стороны участков уплощения профиля и уменьшения радиуса вследствие затекания металла в углы профиля волокна, а также уменьшения диаметра описанной окружности трубы вследствие перемещения трубы и наличия конической формы волокна.

Кроме того, изгиб стенки трубы на значительные углы, например при получении звездообразных труб, может приводить к появлению значительных по величине тангенциальных сил, а также возникновению в углах профиля больших сил трения.

4. При безоправочном профилировании имеет место процесс, внешне характеризующийся наличием зазора между готовой трубой и калибрующим участком волокна, который может быть объяснен наличием протяженной зоны внеконтактной деформации.

5. При профилировании тонкостенных труб при выходе из сечения волокна имеет место процесс упругого последействия, внешне характеризующийся появлением бочкообразности и возникновением выпуклости граней профиля, а в некоторых особых случаях появлением вогнутости или даже потери устойчивости граней.

На продольном разрезе очага деформации показаны характерные особенности процесса профилирования труб, выражающиеся в наличии значительных зон внеконтактной деформации



как при входе трубы в зону профилирования, так и на выходе из нее (рис. 2.3).

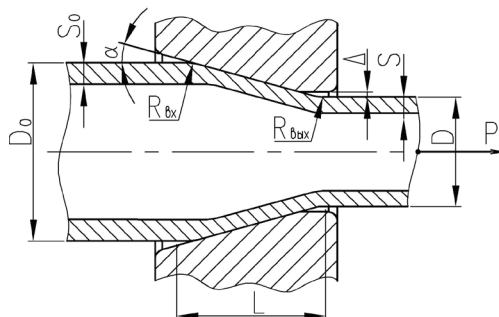


Рис. 2.3. Продольное сечение очага деформации при профилировании:  
 $r_{вх}$  и  $r_{вых}$  — радиусы внеконтактных зон на входе и выходе из очага деформации;  
 $\Delta$  — разность радиусов волокна и готовой трубы

Приведенные данные позволяют заключить, что очаг деформации при профилировании труб (особенно сложной геометрической конфигурации) должен быть рассмотрен в виде объемной модели. На самом деле, например, для рассмотренных случаев профилирования квадратных и шестигранных труб очаг деформации имеет плоскостную симметрию. При волочении квадрата — это четыре плоскости симметрии, а при волочении шестигранника — шесть. Следовательно, в первом случае имеет место осевая симметрия четвертого порядка, а во втором — шестого. Сказанное означает, что определяющие уравнения не могут быть упрощены как в случае осевой симметрии и следует принимать объемную схему очага деформации.

Для моделирования процесса с целью упрощения математического аппарата введем следующие допущения:

1. Модель волокна принимаем недеформируемой, что практически соответствует натурным случаям профилирования при помощи волок из твердых сплавов.

2. Рабочий конус волокна принят имеющим постоянный угол наклона.

3. Материал трубы принимаем изотропным.

4. Закон упрочнения материала при деформации принимаем в виде степенной зависимости.

5. Контактные силы трения принимаем пропорциональными давлению металла на инструмент, при этом коэффициент пропорциональности — величина постоянная, зависящая от материала трущихся пар, их шероховатости и вида смазки.

## **2.2. Основные уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние металла при профилировании**

---

Принятая для дальнейшего расчета объемная схема очага деформации должна позволять определять величины и характер распределения действующих напряжений и деформаций, а также и перемещений, которые в дальнейшем могут быть использованы для описания формоизменения металла, нахождения распределения деформаций, показателя напряженного состояния, степени использования запаса пластичности, отыскания опасных с точки зрения разрушения условий, а также выбора рационального профиля волочильного канала и нахождения энергосиловых параметров процесса.

Наиболее общим методом в этой связи будет использование уравнений теории пластичности для пространственного случая. Поскольку конфигурация очага деформации весьма сложна, и применение цилиндрической системы координат не является правомерным, то для описания принята ортогональная система координат XYZ (рис. 2.1). Система уравнений содержит уравнения равновесия:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

шесть геометрических уравнений, связывающих перемещения и деформации (уравнения Коши):

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial U_x}{\partial x}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial U_y}{\partial y}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial U_z}{\partial z}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial U_z}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial z}; \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

шесть уравнений связи напряжений и деформаций (физические уравнения):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma + 2\tau_s \frac{\varepsilon_x}{F}; \quad \tau_{xy} = \tau_s \frac{\gamma_{xy}}{F}, \\ \sigma_y &= \sigma + 2\tau_s \frac{\varepsilon_y}{F}; \quad \tau_{yz} = \tau_s \frac{\gamma_{yz}}{F}, \\ \sigma_z &= \sigma + 2\tau_s \frac{\varepsilon_z}{F}; \quad \tau_{zx} = \tau_s \frac{\gamma_{zx}}{F}. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Наконец, необходимо задать граничные условия на поверхности в перемещениях или напряжениях:

$$\left. \begin{aligned} p_x &= \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n, \\ p_y &= \tau_{yx} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n, \\ p_z &= \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n, \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

где  $l, m, n$  — направляющие косинусы площадок.

Граничные условия при решении задачи задавали в четырех вариантах. Так граничные условия в перемещениях задаются на переднем конце трубы при исследовании волочения и на заднем при исследовании процесса с проталкиванием. При изучении проталкивания с передним подпором на заднем конце трубы граничные условия задаются в перемещениях, а на переднем конце в напряжениях, при волочении с противонапряжением на переднем конце задаются перемещения, а на заднем конце — напряжения.

Напряженное состояние в точке сплошной среды характеризуется, как известно, симметричным тензором напряжений, содержащим три нормальных и три касательных напряжения. В каждой точке среды существуют три взаимно перпендикулярных площадки, на которых касательные напряжения равны нулю. Перпендикулярно этим площадкам действуют нормальные главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ .

Принимают, что соотношения между главными напряжениями выглядят следующим образом:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \quad (2.5)$$

Главные напряжения следует находить из кубического уравнения, все три корня которого являются вещественными:

$$\sigma^3 - \sigma^2 I_1 + \sigma I_2 - I_3 = 0, \quad (2.6)$$

где

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \\ I_2 &= -(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2); \\ I_3 &= -(\sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2). \end{aligned}$$

Кроме того, будем использовать такие величины, как интенсивность напряжений  $\sigma_i$ , интенсивность касательных напряжений  $T$ , интенсивность деформаций  $\epsilon_i$ , величину гидростатического давления  $\sigma$ , степень деформации сдвига  $\lambda$ .

Интенсивность напряжений в главных напряжениях имеет вид

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (2.7)$$

Интенсивность касательных напряжений

$$T = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}. \quad (2.8)$$

Интенсивность деформаций в главных деформациях, пропорциональных главным напряжениям находим:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]}. \quad (2.9)$$

Степень деформации сдвига

$$\lambda = \sqrt{3} \varepsilon_i. \quad (2.10)$$

Гидростатическое давление

$$\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3. \quad (2.11)$$

Показатель напряженного состояния

$$K = \frac{\sigma}{T}. \quad (2.12)$$

Наконец, в дальнейшем будет использован показатель Лоде, определяемый в виде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (2.13)$$

Рассмотрим особенности определения степени деформации при изучении процесса с использованием конических волок с цилиндрическим калибрующим участком.

Степень пластической деформации, по А. А. Ильюшину, определяется суммой интенсивностей последовательных ма-

лых деформаций сдвига с момента возникновения деформации до момента  $\tau_1$ :

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_{\tau_0}^{\tau_1} H d\tau. \quad (2.14)$$

На этой основе при волочении металла через коническую матрицу можно получить

$$\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^{\tau} H d\tau + \Delta\varepsilon_1, \quad (2.15)$$

где  $\Delta\varepsilon_0$  и  $\Delta\varepsilon_1$  — приращения степени деформации на входе в матрицу и на выходе из нее соответственно.

В частности, в работе В.Л. Колмогорова для любой линии тока найдено

$$\Delta\varepsilon_0 = \Delta\varepsilon_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}} \frac{\bar{r}}{r_0}, \quad (2.16)$$

где  $r_0$  — наружный радиус трубы;  $\bar{r}$  — текущее значение радиуса.

При исследовании задачи будет использована величина работы пластической деформации. Приращение работы внутренних сил жесткопластической упрочняющей среды запишем в виде

$$dA_B = \iiint_N \frac{d\Gamma}{\tau_S} T^2 dV. \quad (2.17)$$

Учитывая условие текучести Мизеса, получаем

$$dA_B = \iiint_N \tau_S d\Gamma dV. \quad (2.18)$$

Используя принятую ниже модель среды из формулы (2.18), получаем на всем пути деформирования

$$A_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \iiint \left[ \sigma_{s_0} \Gamma + \frac{g\Gamma^{b+1}}{b+1} \right] dV. \quad (2.19)$$

Расчеты, проведенные в разд. 3, показали, что контактное давление металла на инструмент меньше предела текучести материала и лежит в пределах

$$\rho = (0,05 \dots 0,45) \sigma_s. \quad (2.20)$$

Сказанное соответствует представлениям о давлении на инструмент при безоправочном волочении труб, хотя и несколько превышает эти величины. Поэтому учет сил трения в рассматриваемом процессе выполнили, используя закон Амонтона:

$$\tau = fp, \quad (2.21)$$

где  $f$  — коэффициент трения для рассматриваемой пары со смазкой;  $p$  — контактное давление в очаге деформации.

Рассмотренная выше математическая модель может быть реализована лишь при наличии уравнения связи сопротивления деформации со степенью деформации для различных случаев рассматриваемых материалов. Модель следует дополнить также методикой расчета степени использования запаса пластичности при деформировании.

### 2.2.1. Модель среды

В общем случае развитой холодной пластической деформации зависимость, связывающая напряжения и сопротивление деформации зависит от марки материала и степени деформации. Аппроксимация этой зависимости может выполняться различными способами. В том случае, когда упрочнение материала мало и им можно пренебречь, считают среду идеально пластической, т. е. напряжения принимают не зависящими от степени деформации. Может встретиться случай, когда эта связь линейна. Кривая упрочнения аппроксимирована степенной зависимостью вида:

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + g\lambda^b, \quad (2.22)$$

где  $\sigma_s$  — текущее значение сопротивления деформации;  $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести;  $g$  и  $b$  — условные коэффициенты, получаемые из опытов.

Опытные зависимости кривых упрочнения приведены на рис. 2.4.

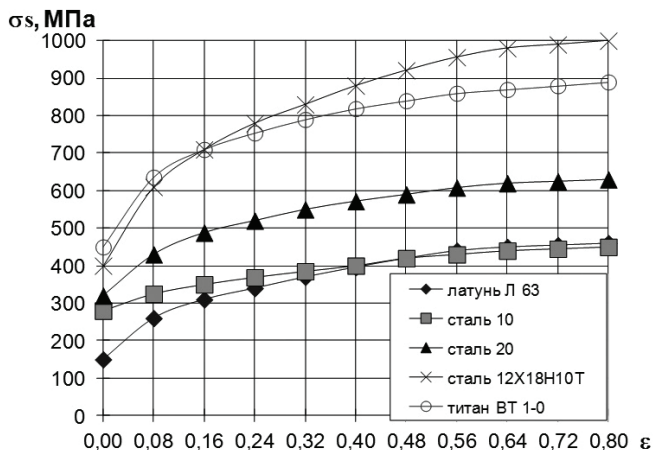


Рис. 2.4. Зависимость предела текучести от степени деформации для исследованных материалов

В табл. 2.1 приведены данные по исследованным в работе материалам

Таблица 2.1

Материал труб	Параметры кривой упрочнения		
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$g$ , МПа	$b$
Сталь 10	280	261,3	0,632
Сталь 20	280,3	418,3	0,390
Латунь Л63	104,4	380,9	0,501
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	321,7	813,4	0,405
Сплав титана ВТ1–0	553,3	421	0,519



## 2.2.2. Расчет степени использования запаса пластичности

В настоящее время является общепризнанным, что для изделий ответственного назначения необходимо рассчитывать степень поврежденности металла после пластической деформации.

Определять этот показатель особенно необходимо в тех случаях, когда изготавливаются трубы из труднодеформируемых материалов (легированные стали, сплавы титана и др.), а также при использовании заготовок с толстыми стенками, когда напряженное и деформированное состояние металла имеет значительный градиент по толщине стенки. При этом значительно увеличивается вероятность разрушения на внутренней поверхности трубы и в местах большого изменения радиуса кривизны стенки при профилировании. Большая часть профильных труб общего назначения может быть получена волочением через профильную волоку в одну операцию. Некоторые же профили протягивают в два прохода через две профильные волоки. Волочение через две профильных волоки может быть осуществлено в одну операцию, если пластичность металла допускает это без разрушения на участках максимальной кривизны, которые обычно приходятся на ребра профиля. В противном случае после первого волочения делают полную подготовку труб к следующей операции, включая термическую обработку.

Совмещение операций волочения позволяет получить довольно значительную экономию, что возможно, если на основе расчетов степени использования запаса пластичности, установлена возможность такого совмещения.

На основе работ В.Л. Колмогорова, а затем А.А. Богатова, С.В. Смирнова сформулирован математический аппарат, позволяющий рассчитать степень использования запаса пластичности  $\omega$ . Выражение для этой величины записывают в виде

$$\omega = \omega_0 + \sum_{i=1}^n \int_0^{\lambda_i} \frac{d\lambda}{\lambda_p} - \Delta\omega, \quad (2.23)$$

где  $\omega_0$  — исходная поврежденность металла до рассматриваемого акта пластической деформации;  $\Delta\omega$  — поврежденность, устранимая термообработкой;  $n$  — число циклов деформации;  $\lambda_p$  — степень деформации до разрушения при заданном напряженном состоянии.

За один переход волочения степень использования запаса пластичности определяли как сумму величин на входе и выходе из волоки, а также при перемещении частицы в очаге деформации, причем при расчете последнего слагаемого показатель напряженного состояния принят средним по очагу деформации.

Величина  $\omega$ , рассчитанная по формуле 2.23, не должна превышать некоторого порогового значения, величина которого зависит от степени ответственности изделия. Так, если  $\omega = 1$ , то возникают видимые глазом трещины; если  $\omega = 0,2...0,3$ , то плотность распределения дефектов и их размеры невелики, и ресурс пластичности может быть полностью восстановлен термообработкой. В том случае, если  $\omega = 0,6...0,7$ , то даже после термообработки ресурс пластичности не восстанавливается и наблюдается остаточная поврежденность.

Отсюда следует, что в зависимости от степени ответственности получаемых профильных труб величину  $\omega$  следует выбирать из диапазона  $\omega \geq 0,2...0,3$  (для труб ответственного назначения) и  $\omega \geq 0,6...0,7$  (для менее ответственных труб).

Для реализации формулы 2.23 следует вычислять степень деформации, накопленную частицей на всем пути деформирования. Особый интерес представляет величина  $\lambda_p$ , определение которой возможно пока только из экспериментов. Некоторые опытные данные для различных значений параметра Лоде приведены на рис. 2.5.

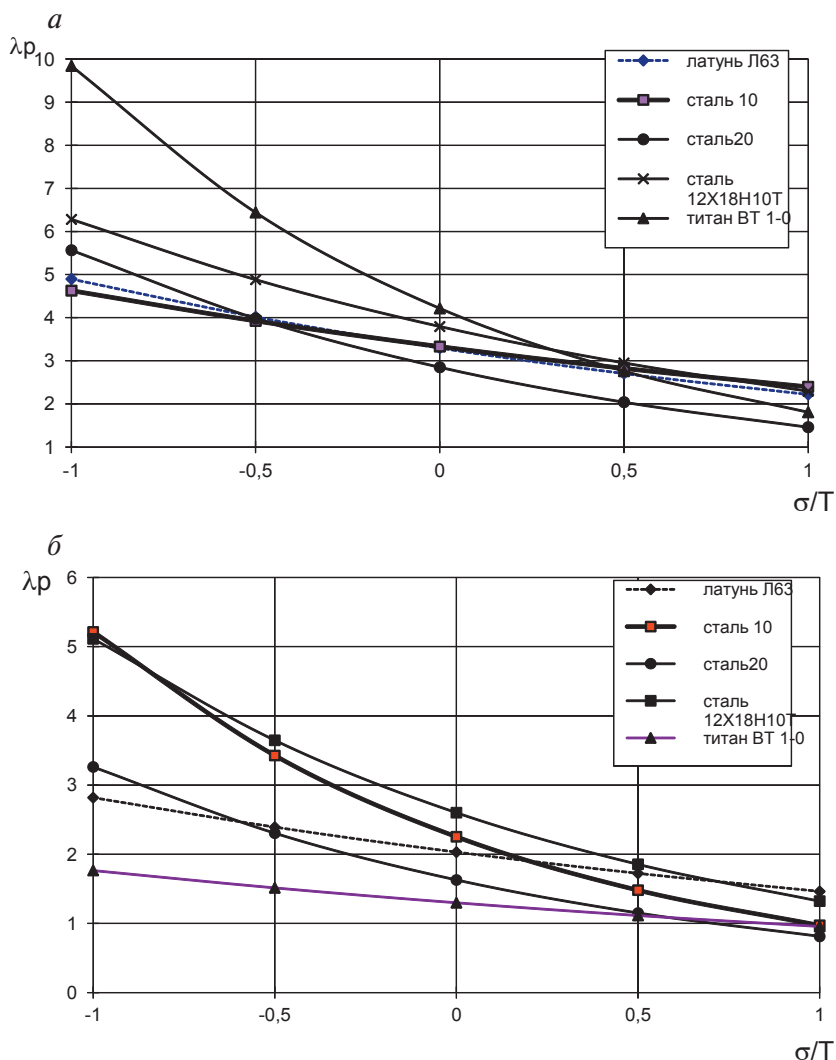


Рис. 2.5. Влияние показателя напряженного состояния на степень деформации до разрушения при различных значениях показателя Лоде:

*a* — для  $\mu_\sigma = -1$ ; *б* — для  $\mu_\sigma = 0$

Они могут быть аппроксимированы, например, зависимостью

$$\lambda_p = [\chi_2 - (\chi_1 - \chi_2)\mu_\sigma] \exp[\lambda_2 - (\lambda_1 - \lambda_2)\mu_\sigma] \frac{\sigma}{T}, \quad (2.24)$$

где  $\chi_1, \chi_2, \lambda_1, \lambda_2$  — коэффициенты, соответствующие опытам при  $\mu_\sigma = -1$  и  $\mu_\sigma = 0$ .

Для исследованных материалов значения этих коэффициентов заданы в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Материал трубы	Значения коэффициентов			
	$\mu_\sigma = -1$		$\mu_\sigma = 0$	
	$\chi_1$	$\lambda_1$	$\chi_2$	$\lambda_2$
Сталь 10	3,33	−0,329	2,253	−0,839
Сталь 20	2,85	−0,669	1,628	−0,695
Сталь 12X18Н10Т	3,794	−0,504	2,601	−0,676
Титановый сплав ВТ 1−0	4,214	−0,848	1,298	−0,307
Латунь Л63	3,296	−0,396	2,030	−0,328

Таким образом, из решения краевой задачи определяют параметры напряженно-деформированного состояния, вычисляются  $\lambda_p$  и  $\omega$ , которое выбирается из указанного выше диапазона.

Определение степени использования запаса пластичности в работе выполнено для двух моделей: профилирование круглой трубы в многогранную в профильной волоке и формовка профильных труб из листа с наложением сжимающих или растягивающих напряжений по контуру изгибаемого профиля. Отметим, что в процессе расчета следует выявить наиболее опасные с точки зрения вероятности разрушения точки, и параметрический анализ выполнять именно для них.

## 2.3. Выбор метода исследования напряженно-деформированного состояния металла при волочении

Полученная выше геометрическая модель процесса профилирования труб является объемной и описывается системой уравнений в частных производных, причем уравнения связи напряжений и деформаций нелинейны. Точное решение такой задачи в настоящее время не представляется возможным, поэтому необходимо использовать приближенные численные методы решения, среди которых, в первую очередь, метод конечных элементов. Идея этого метода заключается в том, что область сплошной среды (очаг деформации) представляется в виде конгломерата подобластей, в каждой из которых деформация среды в результате действия нагрузки описывается с помощью набора выбранных функций, представляющих напряжения и перемещения в данной подобласти. Поскольку эти функции чаще всего выбираются в виде степенных полиномов, то вычисления становятся достаточно простыми.

С математической точки зрения МКЭ является обобщением методом Ритца и Бубнова — Галеркина.

Основное уравнение, используемое при расчете методом конечных элементов, имеет вид

$$[K]\{U\} = \{P\}, \quad (2.25)$$

где  $[K]$  — глобальная матрица механических свойств ансамбля конечных элементов;  $\{U\}$  — вектор-столбец узловых перемещений системы;  $\{P\}$  — вектор-столбец узловых сил.

Коэффициенты матрицы механических свойств материалов для объемного случая являются компонентами четырехвалентного тензора  $K_{ijkl}$ , причем для изотропного материала выполняются следующие свойства симметрии:  $K_{ijkl} = K_{jikl} = K_{ijlk} = K_{klij}$ .

Выражение (2.25) имеет ясный физический смысл, заключающийся в том, что сила и вызванное ей перемещение и свойства среды связаны между собой. Это выражение может быть получено следующим образом. Полная система уравнений, описывающая поведение сплошной среды, обобщается вариационным уравнением вида

$$\delta \left\{ \iiint_V \left[ \int_0^{\Gamma} T(\gamma) d\gamma \right] dV - \iint_S p_i U_i dS \right\} = 0, \quad (2.26)$$

где  $\Gamma$  — накопленная степень деформации сдвига;  $\gamma$  — переменная интегрирования.

Из этого уравнения следует, что вариации работ внешних  $A_{\text{в}}$  и внутренних сил  $A_{\text{вн}}$  равны, т. е.

$$\delta A_{\text{вн}} = \delta A_{\text{в}}, \quad (2.27)$$

Вариация работы внутренних сил имеет вид

$$\delta A_{\text{вн}} = \iiint_V \{ \delta \varepsilon \}^T \{ \sigma \} dV, \quad (2.28)$$

где  $\{ \delta \varepsilon \}$  — вариация вектора деформации;  $\{ \sigma \}$  — вектор напряжений.

Эти величины, как известно, имеют вид

$$\{ \delta \varepsilon \} = \begin{Bmatrix} \delta \varepsilon_x \\ \delta \varepsilon_y \\ \delta \varepsilon_z \\ \delta \gamma_{xy} \\ \delta \gamma_{yz} \\ \delta \gamma_{zx} \end{Bmatrix}, \quad \{ \sigma \} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}. \quad (2.29)$$

В свою очередь, деформации выражаются через перемещения по известным закономерностям, что записывается в виде

$$\{\varepsilon\} = [D]\{U_V\}, \quad (2.30)$$

где  $[D]$  — матрица дифференцирования;  $\{U_V\}$  — перемещения точек объема.

Это же равенство можно записать через перемещения узлов рассматриваемого элемента:

$$\{\varepsilon\} = [D][N]\{U\} = [B]\{U\}. \quad (2.31)$$

Окончательно будем иметь

$$\delta A_{\text{вн}} = \{\delta U\}^T \left( \iiint_V [B]^T [C][B] dV \right) \{U\}, \quad (2.32)$$

где  $[C]$  — матрица свойств материала, устанавливающая связь напряжений и деформаций.

Вариация работы сил удельного давления

$$\delta A_{\text{с}} = \int_S \{\delta U_V\}^T \{p\} dS, \quad (2.33)$$

где  $\{p\}$  — вектор распределенной нагрузки.

Проведя здесь аналогичные замены, подставляя  $\delta A_{\text{вн}}$  и  $\delta A_{\text{с}}$  в уравнение (2.27), получим (2.25).

Таким образом, в развернутой форме (для всего тела после суммирования по всем элементам) будем иметь для  $[K]$  и  $[P]$  следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} [K] &= \sum_{m=1}^M \iiint_V [B]^T [C][B] dV; \\ [P] &= \sum_{m=1}^M \iint_S [N]^T \{p\} dS. \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Имеющееся на настоящее время большое количество программных реализаций метода МКЭ, например COSMOS,

NASTRAN, ALGOR, ANSYS, DEFORM, отличаются друг от друга способом реализации выписанных выше уравнений. Для примера рассмотрим последовательность решения, принятую в пакете ANSYS. В этой программе алгоритм пошаговой процедуры реализации кратко выглядит так:

1. Вычисляются исходные (или для данного следующего шага) механические свойства материала.

2. По заданному перемещению границы рассматриваемой области (передний конец трубы при волочении или задний — при протягивании) находятся текущие значения деформаций.

3. На основе физических уравнений связи находятся компоненты напряжений и интенсивность напряжений, которые затем на основе критерия Мизеса сравниваются с пределом текучести, вычисленным с учетом упрочнения материала.

4. Если указанный выше критерий выполняется, то вычисляется множитель, устанавливающий связь между приращениями пластических деформаций и функцией напряжений, определяющей направление пластических деформаций.

5. На новом шаге перемещения границы вновь производится расчет механических переменных очага деформации по процедуре п. п. 1.5 и т. д.

Необходимо отметить, что конечно-элементный метод решения задач пластичности в последнее время успешно применяется для решения задач пластической деформации. В частности, на этой основе исследованы многие задачи трубного производства: безоправочное волочение круглых труб, деформация трубной заготовки в процессе винтового обжатия, процесс обжатия тонкостенных и толстостенных труб и др., а также процессы штамповки.

Метод МКЭ является весьма эффективным, но требует в каждом конкретном случае оценки точности и экспериментальной проверки.



## 2.4. Конечно-элементная модель очага деформации

---

Построение конечно-элементной модели очага деформации при волочении выполнено в несколько этапов.

1. На первом этапе построен чертеж продольного профиля волокна с использованием графического пакета Компас.

Чертеж определяет конфигурацию продольного сечения волокна (по двум противоположащим граням в случае проектирования шестигранной или квадратной волокна, либо по двум большим граням в случае проектирования волокна прямоугольного профиля). Необходимо выполнение двух условий, а именно: возможности проникновения исходной трубы в волоку, что обеспечивается некоторым превышением диаметра вписанной окружности входной части рабочего конуса волокна над наружным диаметром исходной трубы, а также обеспечения соответствия величины периметра выходного сечения волокна периметру исходной трубы. При выполнении последнего условия следует учитывать, что рекомендованным является некоторое превышение (на 0,5–5 %) периметра исходной трубы над периметром готового профиля для компенсации вытяжки трубы и более точного заполнения профиля.

Создание дальнейших моделей производится в пакете SolidWorks.

2. Создание эскиза входного профиля.

По определенному ранее радиусу вписанной окружности из ее центра создается описанный вокруг этой окружности профиль входного сечения (в случае проектирования волокна с плавным переходом «круг — многоугольник» входным профилем является сама окружность). Для проверки возможности проникновения трубы в волоку может быть отрисовано сечение трубы, которое должно помещаться во вписанную окружность.

3. Создание объемного эскиза рабочей конусной части волокна.

Выбран объемный тип задачи, моделирующий формоизменение трубы в целом. В данном случае было решено отказаться от создания модели для профилирования на одной из граней в связи с предположением о том, что зоны воздействия инструмента на трубу перекрываются и взаимно влияют друг на друга. В этом случае объемное моделирование очага деформации при профилировании позволяет получить картину процесса, максимально близкую к натурной.

Для создания объемного эскиза рабочей части волокна с плоскими гранями и с плавным переходом «круг — многогранник» могут использоваться разные методики. В первом случае — многогранник, являющийся эскизом входного профиля, вытягивается на длину конусного участка с заданным углом конусности. Полученная усеченная пирамида является объемом конусной части волокна. Во втором случае — на расстоянии от эскиза круглого входного отверстия, равном длине волокна, отрисовывается многогранник выходного сечения по определенному ранее радиусу вписанной окружности. Затем инструментом создания криволинейных элементов по их поперечным сечениям создаем замкнутую поверхность перехода от круглого входного сечения к многогранному выходному. Форма образующих выбирается прямолинейной, т. е. каждая точка окружности соединяется с ближайшей к ней соответствующей точкой окружности.

#### 4. Построение эскиза сечения калибрующего участка.

На плоскости выходного сечения полученного объема рабочего участка волокна строится дополнительный эскиз прямолинейного (по конфигурации образующих) калибрующего участка внутреннего профиля волокна. В основном профиль калибрующего участка соответствует сечению выходного участка конусной части волокна, хотя может быть рассмотрена возможность создания профиля калибрующего участка, имеющего отличный от рабочей части профиль. В этом случае требуется выполнение условия беспрепятственного проникновения трубы в калибру-

ющий участок без возникновения повышенного трения, утыкания трубы в торец калибрующей зоны и т. п.

5. Построение объема калибрующей зоны.

Плоский эскиз калибрующего участка вытягивается в объем с указанием необходимого угла конусности участка. В большинстве случаев использовались калибровочные зоны призматической формы (т. е. имеющие нулевой угол конусности).

6. Построение необходимого переходного скругления.

В случае построения моделей волок, имеющих плавный радиальный переход между рабочей и калибрующей частями, производится построение скругления между указанными зонами. Скругление строится по линиям перегиба конусной грани волокни в калибрующую зону, при этом имеется возможность широкого варьирования радиусом закругления. В этом случае варьирование радиусом не оказывает влияния на форму и размеры выходного профиля лишь в том случае, когда радиус скругления не превышает ширину калибрующей зоны модели волокни. На этом этапе построение внутреннего объема модели волокни завершено (рис. 2.6).

7. Построение объема корпуса волокни.

Строится цилиндрическая объемная деталь, имеющая высоту, равную высоте модели внутреннего сечения волокни с диаметром, соответствующим натурной волокне.

8. Создание сборки двух деталей.

Производится транспортирование двух деталей, а именно цилиндрического корпуса и внутреннего объема волокни в файл сборки. Далее производятся необходимые привязки деталей, позволяющие абсолютно точно позиционировать профиль канала волокни относительно ее корпуса. Под словом «привязки» понимается ограничение степеней относительной свободы двух

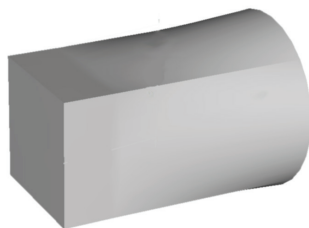


Рис. 2.6. Твёрдотельная модель внутреннего объема рабочего канала волокни

тел, выраженное в отсутствии взаимных перемещений указанных элементов этих тел. Для этого задается совпадение центров плоскости основания цилиндрической модели корпуса с центром вписанной окружности выходного многогранного сечения модели канала волокни. Затем задается коинцидентность (взаимное совпадение) плоскостей выходного сечения волокни и основания цилиндра корпуса. Указанные привязки позволяют говорить о точном совпадении осей этих двух деталей. После осуществления сборки файл со сборкой сохраняется. Таким образом, файл сборки содержит цилиндрическую деталь корпуса волокни с расположенной внутри ее объема деталью канала волокни, входная и выходная плоскость которой лежат на плоскостях оснований цилиндра корпуса волокни.

#### 9. Редактирование детали корпуса волокни.

На основании полученной сборки производится редактирование детали корпуса волокни с учетом указанных геометрических привязок с целью создания полости. Создание полости производится путем булевой операции вычитания объема модели канала волокни из модели ее объема. Таким образом, после вычитания деталь корпуса волокни приобретает сквозную полость, соответствующую форме наружной поверхности модели канала волокни. Деталь корпуса волокни с полостью является готовой исходной объемной моделью волокни, имеющей твердотельный характер.

Части волокни, не взаимодействующие с трубой, такие, как начало заходного конуса и выходной участок с обратной конусностью, в модель не включены, поскольку их отсутствие не влияет на результаты решения. Радиус скругления между гранями волокни принят нулевым, что практически соответствует реальным волокнам. Кроме того, в дальнейшем установлено, что металл практически не взаимодействует с волокни в этой зоне.

#### 10. Импортирование данных в расчетный конечно-элементный пакет.

Данные из трехмерного моделировщика передаются в формате IGES (Initial Graphics Exchange Specification). Этот формат данных предназначен для обмена информацией между системами САПР и другими векторными приложениями, разработан и сопровождается организацией IGES/PDES, аккредитованной при ANSI. Формат является стандартом де-факто для систем САПР и поддерживается практически всеми разработчиками таких программных продуктов. Основная область применения данного формата — передача информации о трехмерных геометрических моделях для множества систем как IBM-совместимых, так и прочих.

Таким образом, данные в формате IGES могут быть импортированы практически в любой существующий на настоящее время пакет конечно-элементного анализа.

### 11. Импортирование в САЕ-пакет.

Объемная модель волокни в формате IGES импортируется в расчетный САЕ-пакет конечно-элементного анализа (FEA). После импортирования производится смещение модели для получения совпадения центра вписанной окружности входного сечения с началом системы отсчета (нуль системы координат).

### 12. Масштабирование модели волокни.

Следующим шагом является проверка размеров модели волокни по ключевым размерам (например, по размерам выходного сечения и длине канала волокни) на соответствие запроектированным. При этом необходима проверка отсутствия смещения модели волокни относительно начала координат.

### 13. Создание модели отрезка трубы.

Для моделирования взаимодействия трубы и волокни непосредственно в пакете конечно-элементного анализа (при помощи стандартного препроцессора) происходит создание объемного примитива — полого цилиндра, имеющего заданные размеры трубы и длину, позволяющую с уверенностью избежать распространения концевых эффектов на основную часть трубы. По проведенным опытам достаточная длина модельно-

го отрезка составляет 3–4 диаметра трубы, например для трубы диаметром 30 мм длина отрезка принималась равной 100 мм.

Модель трубы не содержит закованного заходного конца, что несколько расходится с реальным процессом производства, однако после прохождения переднего конца трубы через волоку процесс предельно приближается к реальному.

14. Относительное позиционирование моделей трубы и волоки.

Целью данного этапа является создание условий для беспрепятственного и точного попадания переднего конца трубы во входную часть рабочего конуса волоки, для чего осуществляется центрирование модели трубы на совпадение ее оси с осью модели волоки. Недопустимым также является наличие пересечения объемов этих двух моделей, для чего заранее задается зазор между поверхностью профилировочного канала и передней и наружной поверхностями трубы. Задание зазора производится расположением трубы на уровне плоскости корпуса волоки на ее входном конце (рис. 2.7).

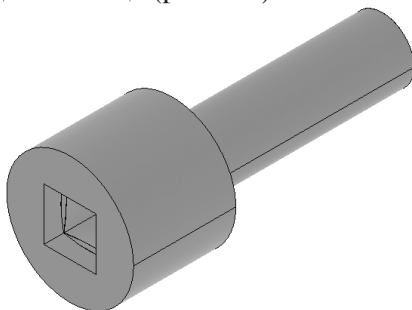


Рис. 2.7. Корректно позиционированные твердотельные модели трубы и волоки в исходном состоянии

#### 15. Выбор типа конечных элементов.

Указанный этап является чрезвычайно важным как в плоскости точности решения, так и времени, затрачиваемого на конкретный шаг решения.

Созданные на текущий момент объемные модели волоки и трубы отличаются сложной геометрической формой, содержат поверхности сложной криволинейной формы, что определяет выбор элементов в виде трехгранных пирамид (тетраэдров). Область применения этих элементов в достаточной мере отвечает как конфигурации модели, так и трехмерной размерности задачи.

В то же время для более простых конфигураций модели волоки (без скруглений, плавных переходов) допускается моделирование ее рабочих свойств в виде модели, ограниченной только плоскостями рабочих граней. В этом случае применение объемных конечных элементов невозможно, а используются плоские элементы оболочечного типа (shell), имеющие треугольную или параллелограммную форму. Хорошие результаты (с точки зрения скорости решения при сохранении его точности) в этом случае дает применение упорядоченной сетки элементов, расположенной таким образом, что границы элементов находятся вдоль основных ребер многогранного профиля волоки.

Объемная модель волоки является, однако, наиболее полно отражающей рабочие свойства волоки, поэтому для сложных конфигураций волоки с плавным переходом от круглого к многогранному внутреннему профилю канала модель была принята объемной.

Кроме того, были приняты во внимание такие факторы, как сложность картины напряженно-деформированного состояния для описания на плоских и осесимметричных моделях и имеющаяся необходимость определения картин распределения удельных давлений по сложной поверхности контакта инструмента и трубы.

### 16. Задание свойств материала волоки и трубы.

Свойства материала трубы заданы в виде таблицы значений соответствия напряжений деформациям при испытаниях на реальном образце. Эти значения при построении образуют кривую упрочнения материала. Температура испытаний при-

нята равной 0 °С, поскольку профилирование трубы происходит в холодную и значительного разогрева трубы в процессе деформирования не происходит. Таким образом, задание свойств материала ограничено заданием данных, достаточных для построения кривой только для указанной температуры.

Свойства материала волокна отражают недеформируемость волокна, что практически соответствует случаю применения волокон из твердого сплава, например ВК-4.

17. Задание реальных констант для конечных элементов модели.

В том случае, когда моделирование процесса производится в волокне с плоскими гранями и плоским типом элементов, требуется задание реальных констант, основной из которых является толщина оболочки. Поскольку модель волокна принята недеформируемой, то толщина стенки волокна не оказывает влияния на процесс профилирования. Толщина оболочки во всех случаях принята равной 1 мм.

18. Разбивка моделей трубы и волокна выбранными типами конечных элементов.

Следует отметить, что одной из основных целей разбивки твердотельной модели конечными элементами является получение максимально точной копии твердотельной модели, описанной набором конечных элементов, при поддержании минимального количества конечных элементов, составляющих модель. Такое требование имеет под собой цель снижения времени решения, что позволяет получить большее количество вариаций расчетных условий за тот же отрезок расчетного времени.

Кроме того, установлено, что снижение количества конечных элементов на поверхностях инструмента, не вступающих в контакт, не влияет на результат решения. Вследствие этого наружная поверхность корпуса волокна разбита весьма грубо и представляет собой многогранную призму, моделирующую цилиндр (рис. 2.8.).



Вышеуказанный постулат справедлив и для плоских граней канала волоки с шестигранным входным сечением. В этой связи, грани волоки разбиты всего на 8–12 элементов, и при этом их форма отображена абсолютно точно.

В случае разбивки криволинейных волок требуемое для точного отображения формы количество элементов значительно возрастает. В то же время зоны внутреннего сечения, не вступающие в контакт с высокой степенью вероятности, разбиваются грубо, тогда как в зонах контакта форма поддерживается достаточно хорошо.

Кроме того, очевидно, что линейный размер конечных элементов, образующих модель трубы не может быть большим толщины стенки. В этой связи при профилировании особо тонкостенных труб имеет место значительное сгущение конечно-элементной сетки, увеличивающее время решения задачи.

Следует отметить, что разбивка твердотельных моделей носит итеративный характер, и зачастую требуемой формы и точности конечно-элементной модели удастся достичь лишь последовательным перебором соотношений плотностей разбивки для отдельных частей модели.

#### 19. Контроль ошибок разбивки.

Типы контроля ошибок разбивки определяются, прежде всего, критериями оценки ошибок, заложенными в программу, осуществляющую разбивку, а также преследуемыми целями. Основной контроль ошибок осуществлялся в плоскости поиска значительных искажений формы при первичной разбивке, при условии минимизации числа конечных элементов, использованных в модели.

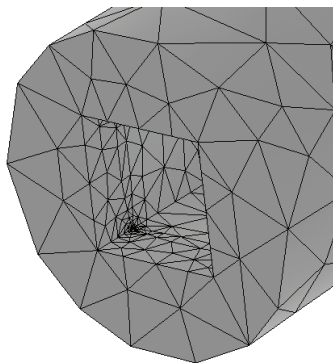


Рис. 2.8. Конечно-элементная сетка модели в зонах, не вступающих в контакт

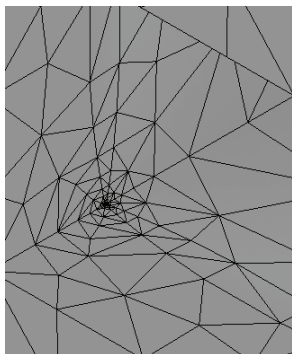


Рис. 2.9. Локальное сгущение конечно-элементной сетки в зоне волоочильного канала с переходным радиусом

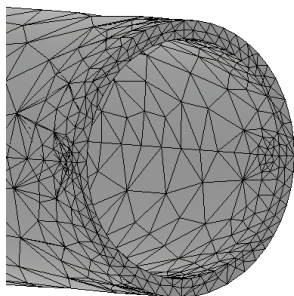


Рис. 2.10. Локальное сгущение конечно-элементной сетки на переднем по ходу волочения торце модели трубы

В среднем удавалось достичь приемлемого соотношения этих двух параметров при числе конечных элементов в модели трубы около 30–45 тыс. шт., что обуславливало приемлемое время решения задачи (45–90 мин).

## 20. Локальное сгущение сетки.

Действенным инструментом воздействия на точность разбивки при минимизации количества элементов модели является также способ локального сгущения сетки вблизи важных точек, имеющих малые размеры по сравнению с размерами всей модели. Этот элемент позволяет пошагово повышать плотность конечно-элементной сетки в зоне важной (в плане точности получаемых результатов) детали объекта, добиваясь приемлемой точности отображения ее конфигурации (рис. 2.9).

Для рассмотренной модели такое сгущение производилось на внутренней криволинейной поверхности волоки, на переднем выходном конце трубы (рис. 2.10), в зоне скругления на переходе из профилирующей части волоки в калибрующую.

Критерии, используемые при локальном сгущении конечно-элементной сетки, были следующими:

а) получение формы конечно-элементной модели, отражающей исходную геометрическую модель;

б) визуальная оценка гладкости криволинейных плоскостей, в особенности вступающих в контакт;

в) достаточная плотность конечно-элементной сетки в зонах снятия результатов расчета с модели;

г) минимизация количества элементов, вступающих в контакт для повышения скорости решения.

#### 21. Задание степеней свободы и рабочих нагрузок.

Следующей задачей после формирования конечно-элементной модели является задание системы степеней свободы, а также воздействий, моделирующих рабочие взаимодействия детали и инструмента.

Модель волокна была принята недеформируемой, и это ее данное свойство промоделировано отсутствием степеней свободы по всем трем координатным осям. Таким образом, всем узлам конечно-элементной сетки, образующей систему элементов, моделирующих волоку, запрещено линейное перемещение по каждой из координатных осей.

Решение задачи, кроме задания рабочих взаимодействий требовало также создания статически определимого расчетного случая. С этой целью к хвостовому недеформированному участку трубы приложены ограничения степеней свободы по осям координат, лежащих в ее плоскости. Подобные ограничения достаточно близки к натурным и отражают воздействие на трубу направляющего аппарата волочильного стана, например входной роликоправильной машины.

Однако в случае моделирования процесса полного протягивания отрезка трубы через волоку насквозь такое ограничение становится препятствием для благополучного завершения решения. Это связано с тем фактом, что хвостовое сечение трубы приобретает свойство несжимаемости, поскольку все его точки не могут перемещаться в плоскости, перпендикулярной оси трубы. В этом случае ограничения задаются другим способом, а именно, степени свободы ограничиваются по отдельности у четырех точек на вертикальной оси хвостового сечения по горизонтальной оси, а у четырех точек на горизонтальной оси сечения — по вертикальной. Такое ограничение не пре-

пятствует радиальному обжатию сечения, и в то же время труба имеет определенные степени свободы по всем трем координатным осям, а следовательно, задача статически определена.

## 22. Задание условий контактного взаимодействия.

Определение условий контактного взаимодействия складывается из определения и задания поверхностей, вступающих в контакт, определения для контактирующих поверхностей направления вектор-нормалей, указания условий трения на контакте.

Вектор-нормаль контакта указывает, с какой стороны модель тела является непроницаемым для вступающего с ним в контакт тела.

Поскольку внутренняя поверхность волок с криволинейным профилем содержит достаточно большое количество плоскостей, то в качестве контактирующего объекта указано все тело. При таком задании вектор-нормали автоматически располагаются по направлению наружу («изнутри» объекта). При этом на наружной поверхности корпуса волок вектор-нормали элементов направлены наружу, на поверхности рабочего канала они имеют направление внутрь навстречу друг другу (рис. 2.11).

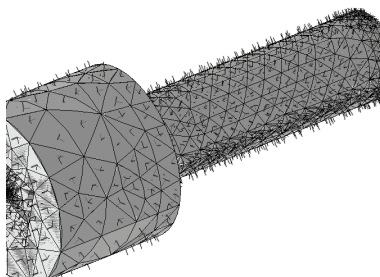


Рис. 2.11. Расположение вектор-нормалей контакта на конечно-элементных моделях волок и трубы

Поскольку поверхность модели трубы имеет значительно более развитую наружную поверхность, чем у волок, то для эконо-

номии времени и снижения количества контактных конечных элементов в качестве контактирующих поверхностей указана только наружная поверхность трубы. Такое допущение полностью соответствует натурной трубе, у которой внутренняя поверхность с волокой не контактирует.

Программа задания контактных взаимодействий требует указания поверхности — цели (как правило, неподвижной) и поверхности, контактирующей с ней. В качестве поверхности — цели выбрана модель волоки.

Задание условий контактного трения произведено путем определения и задания коэффициента трения для соответствующего материала трубы.

### 23. Решение поставленной задачи.

Решение сформулированной ранее задачи является достаточно автоматизированным процессом, который требует в то же время правильного определения ряда комплексных по своему влиянию на процесс решения переменных, среди которых можно назвать количество отдельных подшагов (substeps) задачи. Количество подшагов в целом определяет количество частей, на которые будет разбито полное перемещение трубы.

При этом должно соблюдаться условие, при котором величина интенсивности деформации на протяжении каждого подшага не превышает некой установленной величины, при которой для выбранного материала трубы наступает разрушение. Превышение этого параметра в процессе решения говорит либо о значительной интенсивности деформации, либо о слишком крупных размерах конечных элементов в зоне деформации.

Оба этих явления носят негативный характер, и условия, вызвавшие их, должны быть скорректированы для получения приемлемой точности решения.

Таким образом, для задач со значительными величинами перемещений или деформаций требуется увеличение количества подшагов. В то же время чрезмерное его увеличение может привести к значительному возрастанию времени решения без

повышения точности решения. Таким образом, выбор количества подшагов, а также пороговой интенсивности деформаций является процессом, носящим поисковый характер.

#### 24. Получение результатов и их интерпретация.

Получение результатов по полученным данным для каждого узла модели производится несколькими программами — постпроцессорами. Основными видами пользовательских интерфейсов являются цветные схемы распределения величин по заданному объему (плоскости), позволяющие наглядно представить положения максимумов и минимумов искомых величин, а также оценить распределение значений по зоне деформации. Одним из вариантов этого типа отображения также может служить отображение изоповерхностей, на которых лежат точки тела с одинаковыми значениями искомой величины.

В случае необходимости определения значений в заранее заданных точках используется табличный вывод значений требуемых величин по номерам узлов. Такой метод позволяет вычислять, например, значения степени использования ресурса пластичности в конкретно определенной точке.

Для оценки хода процесса деформирования во времени используется также анимационный тип отображения этих картин, позволяющий судить, например, о траектории течения материала по профилирующему инструменту.

Кроме того, предоставляется возможность определения значений величин в толщине стенки трубы при продольном и поперечном ее сечении, а также их распределение по толщине стенки.

Таким образом, в процессе решения определялись следующие величины.

1. Перемещения отдельных узлов конечно-элементной сетки, определяющие форму готового профиля как по выходу из волокна, так и в процессе профилирования.

2. Возникающие в материале трубы деформации в виде интенсивности деформаций в узлах конечно-элементной сетки, а также ее упругая и пластическая составляющие.

3. Интенсивность напряжений.
4. Главные напряжения.
5. Гидростатическое давление.
6. Удельное давление на контакте трубы и волокна.
7. Работа пластической деформации.

По этим значениям вычислялись следующие величины.

1. Показатель напряженного состояния  $\sigma/T$ .
2. Степень использования ресурса пластичности  $\omega$ .

По созданной методике рассчитан ряд задач профилирования шестигранных, квадратных и прямоугольных труб в волокнах четырех различных конфигураций с различной сложностью профиля волоочильного канала.

## 2.5. Методика расчета степени использования ресурса пластичности при формовке профильных труб из листа

---

Для расчета степени использования запаса пластичности за переход при формовке профильных труб следует найти напряженно- деформированное состояние металла в этом процессе, определить на этой основе гидростатическое давление и параметр Лоде, по кривой пластичности вычислить предельную пластичность и найти  $\omega_i$ . Поскольку формовка ведется в несколько проходов, то суммарная степень использования запаса пластичности будет

$$\omega_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad (2.35)$$

где  $n$  — число переходов при формовке.

Выражение для гидростатического давления в рассматриваемой задаче имеет вид

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{\theta} + \sigma_{\rho} + \sigma_z). \quad (2.36)$$

В теории профилирования принимается, что деформация листа в направлении, перпендикулярном плоскости изгиба, равна 0, т. е.

$$\varepsilon_z = 0. \quad (2.37)$$

Приращения пластических деформаций связаны с напряжениями зависимостями

$$d\varepsilon_p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_p - \sigma); \quad d\varepsilon_\theta = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_\theta - \sigma); \quad d\varepsilon_z = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_z - \sigma), \quad (2.38)$$

где  $d\varepsilon_i$  — приращение интенсивности пластических деформаций.

На основании (2.37) заключаем  $d\varepsilon_z = 0$ , тогда из (2.38) получим  $\sigma_z = \sigma$ .

В результате из выражения (2.36) имеем

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_\theta + \sigma_p). \quad (2.39)$$

Тогда интенсивность деформаций в этом процессе

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\theta - \sigma_p). \quad (2.40)$$

В случае наложения тангенциальных сжимающих или растягивающих напряжений их действие, согласно работе И. С. Тришневского, М. Е. Докторова, учитывается в формулах для напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_p$ .

Решения для напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_p$  получены в работе М. В. Сторожева, Е. А. Попова на основе модели линейного упрочнения. Ранее упрочнение учтено в виде зависимости (2.22), из которой можно получить модуль упрочнения в виде

$$\Pi = \frac{d\sigma_s}{d\lambda_i} = gb\lambda_i^{b-1}. \quad (2.41)$$



Тогда выражения для напряжений можно записать, например для зоны растяжения, в виде

$$\sigma_{\rho} = - \left( \sigma_{s_0} + \frac{bg\lambda_i^{b-1}}{2} \ln \frac{\rho R_H}{\rho_H^2} \right) \ln \frac{R_H}{\rho};$$

$$\sigma_{\theta} = \left[ \sigma_{s_0} \left( 1 - \ln \frac{R_H}{\rho} \right) + \frac{bg\lambda_i^{b-1}}{2} \left( 2 \ln \frac{\rho}{\rho_H} - \ln \frac{\rho R_H}{\rho_H^2} \ln \frac{R_H}{\rho} \right) \right]. \quad (2.42)$$

Подобные формулы можно записать и для зоны сжатия.

Выражение для параметра Лоде:

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (2.43)$$

Имея в виду, что  $\sigma_1 = \sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_2 = \sigma_z$  и  $\sigma_3 = \sigma_{\rho}$ , получим  $\mu_{\sigma} = 0$ .

Учитывая (2.39), а также принимая условие пластичности в форме Мизеса:

$$T = \tau_s, \quad (2.44)$$

получаем для показателя напряженного состояния выражения

$$\left( \frac{\sigma}{T} \right)_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ \sigma_{s_i} \left( 1 - \ln \frac{R_H}{\rho} \right) + \frac{1}{2} bg\lambda_i^{b-1} \left( 2 \ln \frac{\rho}{\rho_H} - \ln \frac{R_H \rho}{\rho_H^2} \ln \frac{R_H}{\rho} \right) - \right.$$

$$\left. - \left( \sigma_{s_i} + \frac{1}{2} bg\lambda_i^{b-1} \ln \frac{R_H \rho}{\rho_H^2} \right) \ln \frac{R_H}{\rho} \right] \sigma_{s_i}^{-1} \text{ — для зоны растяжения,} \quad (2.45)$$

$$\left( \frac{\sigma}{T} \right)_i = - \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ \sigma_{s_i} \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r_B} \right) + \frac{1}{2} bg\lambda_i^{b-1} \left( 2 \ln \frac{\rho_H}{\rho} + \ln \frac{\rho_H^2}{\rho \cdot r_B} \ln \frac{\rho}{r_B} \right) + \right.$$

$$\left. + \left( \sigma_{s_i} + \frac{1}{2} bg\lambda_i^{b-1} \ln \frac{\rho_H^2}{\rho \cdot r_B} \right) \ln \frac{\rho}{r_B} \right] \sigma_{s_i}^{-1} \text{ — для зоны сжатия.} \quad (2.46)$$

Выражения для радиуса нейтральной линии находим по формуле (1.11), а при наличии подпора в калибре в виде выражения (1.16).

В каждом технологическом проходе наружные слои получают приращение деформации:

$$\varepsilon = \ln \frac{S_n (R_H)_n \rho_{n-1}}{S_{n-1} \rho_n (R_H)_{n-1}}, \quad (2.47)$$

где  $S_n$  и  $S_{n-1}$  — толщина заготовки в рассматриваемом и предшествующем проходах.

Суммарная деформация определяется например по формуле

$$\varepsilon = \ln \frac{2R_H}{R_H + R_B} \frac{S_0}{S} \quad (2.48)$$

Известно несколько различных формул для подсчета утонения стенки  $\Delta S$  при изгибе. Можно эту величину находить, например по формуле

$$\Delta S = 0,06 S_0 \sqrt{\frac{b \alpha^{2/3}}{r_B}}, \quad (2.49)$$

где  $b$  — ширина подгибаемого элемента, мм;  $\alpha$  — угол подгибки, рад.

Поскольку процесс подгибки листа является многостадийным, а учет упрочнения металла производится, как указано выше, в виде линейной зависимости, то примем следующую схему вычисления сопротивления деформации (рис. 2.12).

На первом переходе деформирования вычисляем  $\sigma_{s_0}$  и  $\operatorname{tg} \varphi_0$ . Для степени деформации сдвига  $\lambda_1$  по этим значениям находим  $\sigma_{s_1}$  и  $\operatorname{tg} \varphi_1$  и т.д. Таким образом, может быть найдена степень использования запаса пластичности при наличии подпора и растяжения металла в калибре.

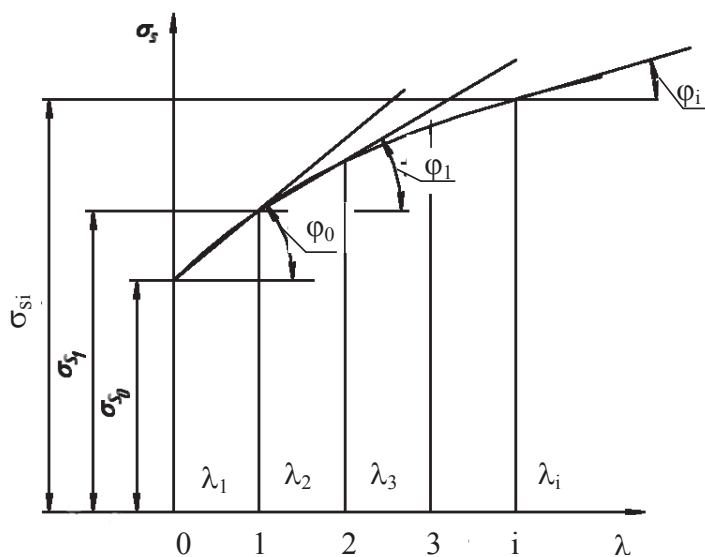


Рис. 2.12. Аппроксимация кривой упрочнения материала мультILINEЙНОЙ зависимостью

### 3. Анализ процесса профилирования труб и рекомендации по его совершенствованию

---

#### 3.1. Диапазон варьируемых параметров

---

**П**ри проведении параметрического анализа процесса профилирования необходимо установить диапазон изменения значимых для процесса профилирования варьируемых параметров. К ним относятся:

- относительная толстостенность труб;
- конфигурация и параметры волоочильного инструмента;
- способы приложения к трубе продольного деформирующего усилия;
- величина перемещения торца трубы при проведении расчетов;
- значение коэффициента трения металла по волоочильному инструменту.

Выбор диапазона варьируемых параметров по типоразмерам труб проведен таким образом, чтобы в наибольшей степени охватить производимый в настоящее время волочением сортамент профилей. За основную сравниваемую величину принята относительная толстостенность  $S/D$ , которая варьировалась в пределах 0,03...0,103 для труб диаметром 29...32 мм и 0,08...0,09 для диаметров 11–12 мм.

Для шестигранных труб исследовали влияние конфигурации волоки трех типов: без калибрующего пояса, с калибрующим

пояском длиной 5 мм и с плавным переходом между рабочей зоной и калибрующим пояском (радиус закругления 10 мм). Для волочения квадратных труб конфигурация волоки соответствовала описанному выше третьему типу с некоторыми усложнениями, приведенными далее.

Конфигурации подобных типов приняты по двум соображениям.

1. Волоки подобного очертания в принципе применяются в практике трубного производства при волочении круглых труб;

2. Вариант формы инструмента, который допускает массовое изготовление в заводских условиях с небольшими затратами.

Кроме того, принято, что конусная часть волоки имеет плоские грани, угол конусности  $8^\circ$ , а выходное сечение шестигранного профиля размером: «под ключ»  $H = 27$  мм.

Приложение деформирующего усилия рассмотрено в четырех вариантах:

- к переднему концу трубы (волочение);
- заднему концу трубы (проталкивание);
- заднему и переднему концам (волочение с противонапряжением);
- заднему и переднему концам (проталкивание с передним подпором).

Величина перемещения переднего (при волочении) или заднего (при проталкивании) конца трубы определяет количество итераций при расчете и, следовательно, машинное время расчета. Вместе с тем известно, что на переднем и заднем концах формоизменение имеет особенности. Значит, необходимо задать такое перемещение, при котором бы реализовался установившийся процесс формоизменения. В этой связи для малых типоразмеров труб обеспечивается перемещение (достаточное для выхода трубы из волоки) 15...20 мм, а для труб большего типоразмера — 40...60 мм.

Для одного расчетного случая рассмотрен полный процесс волочения отрезка трубы длиной 100 мм. Таким образом, в этом

случае рассматривался вход металла в волоку, выход переднего свободного конца трубы из волоки, процесс профилирования основной части трубы, вход и выход из волоки свободного заднего конца трубы, иными словами, весь ход процесса профилирования.

Контактные взаимодействия трубы и инструмента учитывали, как указано выше, в виде модели Амонтона — Кулона, причем коэффициент трения соответствовал литературным данным, изменялся в пределах  $0 \dots 0,1$  и до  $0,2$  при сравнении теории с экспериментом.

На первом этапе анализа выполнен поиск рациональной геометрии инструмента для волочения труб, на втором этапе — исследовали напряженно-деформированное состояние металла и отыскивали степень использования запаса пластичности с использованием инструмента, имеющего рациональную геометрию канала.

### **3.2. Рациональная геометрия волочильного канала**

---

Поиск рациональной геометрии волочильного канала при профилировании труб выполнили из нескольких условий:

1. Отыскание параметров, при которых распределение контактных давлений будет более равномерным.

2. Определение условий, при которых удельная работа пластической деформации более равномерно распределена по объему деформируемого металла. Отметим, что работа пластической деформации в значительной степени определяет износ инструмента, а следовательно, и его стойкость.

3. Распределение интенсивности пластических деформаций по сечению желательнее иметь более равномерным, что определяет служебные свойства полученных труб.

4. Минимизация технологического усилия, обеспечивающего процесс деформации.

При решении этой задачи, как указано выше, было рассмотрено четыре типа волоочильного канала:

1. Сужающийся канал многогранной формы поперечного сечения (рис. 3.1).

2. Сужающийся канал многогранной формы поперечного сечения с калибрующим участком постоянного сечения (рис. 3.2).

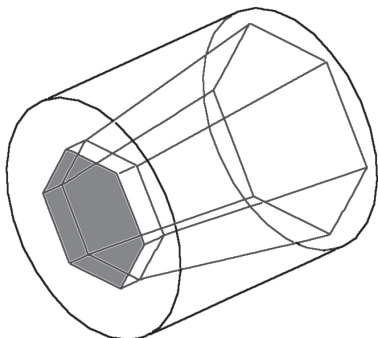


Рис. 3.1. Волоочильный канал типа 1 (в форме усеченной пирамиды с плоскими гранями)

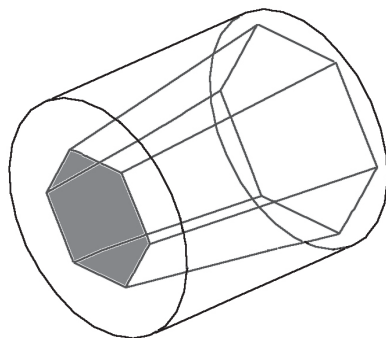


Рис. 3.2. Волоочильный канал типа 2 (в форме усеченной пирамиды с плоскими гранями и калибрующим призматическим участком)

3. Сужающийся канал многогранной формы поперечного сечения с радиальным закруглением к калибрующему участку постоянного сечения (рис. 3.3).

4. Канал с плавным переходом от круглого поперечного сечения к многогранному, калибрующему участку постоянного многогранного поперечного сечения и радиальным закруглением между ними (рис. 3.4).

Реально изготавливаемый инструмент должен иметь на ребрах своего многогранного профиля закругления малого радиуса, которые на рисунках не показаны. Проведенные в дальнейшем расчеты показали, что контакта материала с инструментом в этой зоне нет, а следовательно, величина радиуса закругления

не оказывает влияния на формоизменение трубы. Вследствие этого радиусы закругления на гранях профиля при моделировании приняты равными нулю.

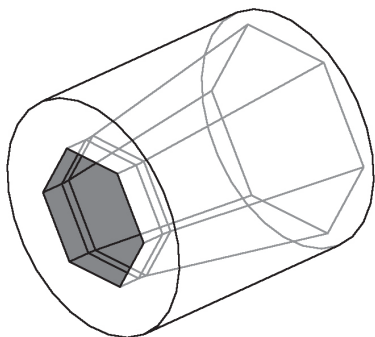


Рис. 3.3. Волоочильный канал типа 3 (в форме усеченной пирамиды с плоскими гранями, калибрующим призматическим участком и радиальным скруглением между ними)

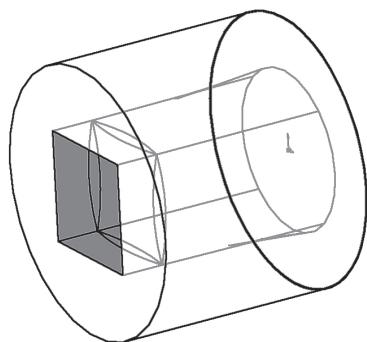


Рис. 3.4. Волоочильный канал типа 4 (с плавным переходом от круглого сечения к профильному, калибрующим участком призматического сечения и радиальным скруглением между ними)

Сравнения производились для случая профилирования шестигранных труб в волоках вида 1, 2 и 3, а также квадратных труб в волоках вида 3 и 4.

Был выявлен ряд закономерностей, среди которых можно назвать значительное снижение величины среднего удельного давления по поверхности контакта, а также сглаживание пиков среднего удельного давления в зоне выхода металла из конусной части волокна для случая применения волок 2, 3 и 4 типов. Кроме того, при переходе от типа 1 волокна к типам 2 и 3 поперечного сечения волокна значительно снижаются величины максимальной интенсивности пластической деформации, а также ее средняя величина по очагу деформации. Эти зависимости отражены на графиках, представленных на рис. 3.5–3.8.



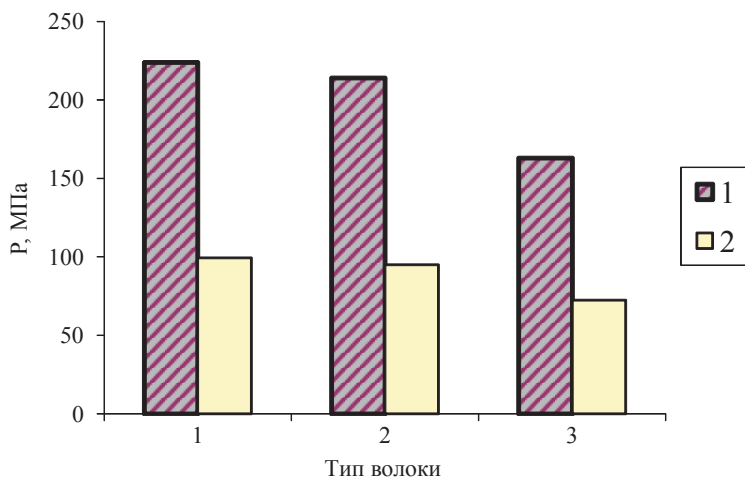


Рис. 3.5. Влияние типа канала волокна на величину максимального (1) и среднего (2) давления в зоне контакта при профилировании шестигранных труб

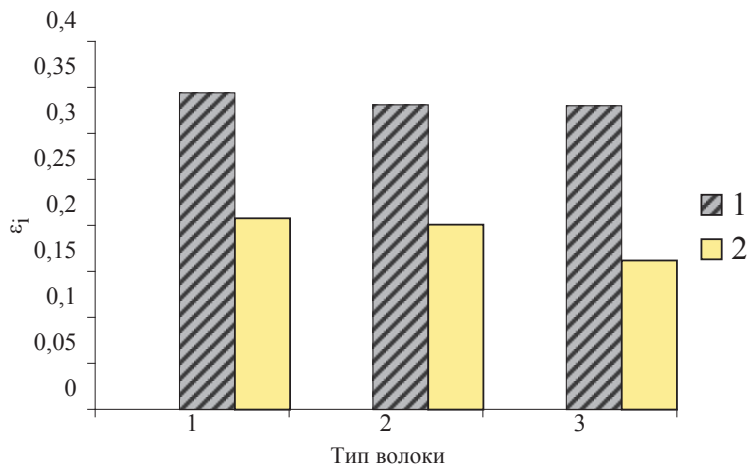


Рис. 3.6. Влияние типа канала волокна на величину максимальной (1) и средней (2) по очагу интенсивности деформаций при профилировании шестигранных труб

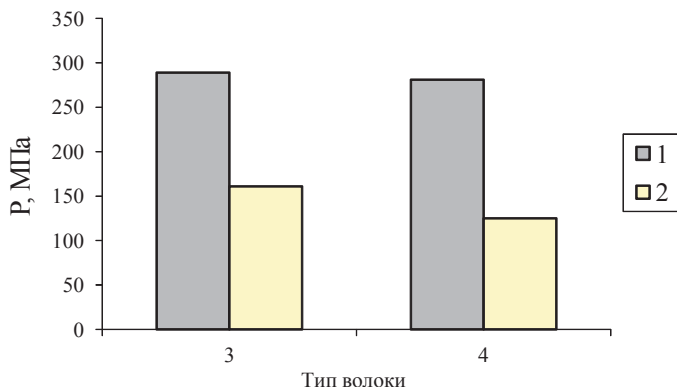


Рис. 3.7. Влияние типа канала волокна на величину максимального (1) и среднего (2) давления в зоне контакта при профилировании квадратных труб

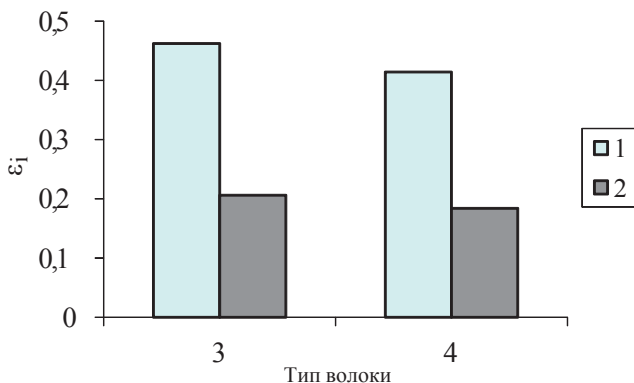


Рис. 3.8. Влияние типа канала волокна на величину максимальной (1) и средней (2) по очагу интенсивности деформаций при профилировании квадратных труб

Описанные особенности, связанные со снижением уровня величин удельных давлений по поверхности контакта трубы с инструментом и уменьшения интенсивности деформаций в зоне профилирования, объясняются следующим образом.

Появление радиуса в зоне перехода конуса волокни в калибрующий участок, а также использование волок с плавным переходом из круглой в профильную часть приводит к исчезновению контакта типа «линия —цилиндр» и «плоскость —цилиндр», приводящих к появлению резких пиков удельного давления, что, в свою очередь, приводит к реализации всего удельного давления на относительно небольших площадях по отношению ко всей внутренней площади волокни.

Замена волок типа 1 на тип 2, 3 и 4 приводит к повышению плавности течения материала за счет действия нескольких основных факторов: уменьшения количества перегибов траектории течения и снижения интенсивности этих перегибов.

Значительное влияние в данном случае оказывает наличие или отсутствие радиусов скругления достаточной величины в переходных зонах между прямолинейными участками.

Профилирование в волокнах с плавным переходом от круглого к многогранному профилю позволяет также получить (в случае проталкивания трубы) эффект всестороннего обжатия трубы в зоне максимальных деформаций (в конусной части волокни), что позволяет добиться снижения интенсивности деформаций, степени использования ресурса пластичности материала трубы.

На графике, изображенном на рис. 3.9, указаны усилия профилирования шестигранных труб типов волокни: 1, 2 и 3. Установлено, что применение волок с прямолинейным калибрующим участком (тип 2) хотя и позволяет достичь лучших характеристик напряженно-деформированного состояния, а также более равномерного распределения удельных давлений по поверхности контакта, но в то же время за счет возникновения дополнительного трения трубы по калибрующей зоне возрастает тяговое усилие профилирования.

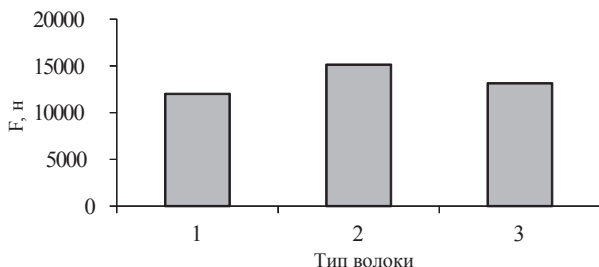


Рис. 3.9. Влияние типа канала волокна на величину тягового усилия профилирования шестигранных труб

В то же время использование волок с калибрующим пояском типа 3 позволяет снизить тяговое усилие и приблизиться по значению усилия к волокнам типа 1 при наличии калибрующего участка. Указанные факты позволяют сделать несколько основных выводов:

1. Значительная доля суммарного давления на контакте реализуется в зоне перехода из профилирующей в калибрующую зону.

2. Профиль перехода из профилирующей в калибрующую зону оказывает значительное влияние как на энергосиловые параметры процесса, так и на параметры напряженно-деформированного состояния в очаге деформации.

Явление, сходное с тем, что было описано при анализе тягового усилия, имеет место и при анализе графика работы пластической деформации для шестигранных труб (рис. 3.10). Для случая профилирования в волокнах типа 2 наблюдается значительный рост величины работы пластической деформации, связанный с тем, что здесь возникает резкое изменение траектории течения металла, приводящее к возникновению дополнительных пластических деформаций весьма значительного объема и необходимой для этого работы. Применение волок типа 3 позволяет увеличить радиусы искривления траектории течения металла и, как следствие, получить величину максимальных

значений работы пластических деформаций, близкую к случаю профилирования в волоке типа 1.

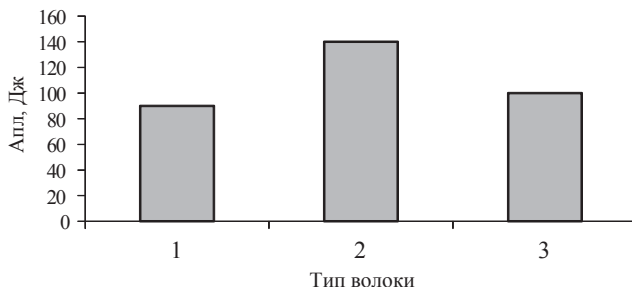


Рис. 3.10. Влияние типа канала волоки на максимальную по очагу деформации величину работы пластической деформации для шестигранных труб

### 3.3. Влияние варьируемых параметров на формоизменение трубы

---

Выяснено значительное влияние наружного диаметра исходной трубы по отношению к периметру волоки на процесс профилирования. Так, при профилировании труб из стали 20 диаметром 32 мм в шестигранной волоке с размером «под ключ» Н27 мм стенка трубы в значительной степени теряет устойчивость, в то же время радиусы в углах шестигранного профиля достаточно малы. При величине диаметра 31 мм потери профилем устойчивости не происходит, однако радиусы закругления в углах готового профиля несколько возрастают. Профилирование труб из заготовок диаметром 30 мм характеризуется незаполнением трубного профиля, а следовательно — значительными радиусами закругления.

Значительным образом влияет на радиус закругления углов готового профиля и на величину потери устойчивости стен-

кой такая величина, как относительная толстостенность трубы и абсолютная величина толщины ее стенки. Трубы с малой относительной толстостенностью характеризуются малыми величинами радиусов закругления и малой степенью потери устойчивости стенкой, для больших величин толстостенности характерны обратные явления. Для труб из стали 20 с наружным диаметром 31 мм и стенкой 1 мм имеет место малый радиус закругления, в то же время потери устойчивости стенкой практически не происходит.

Изменение величины коэффициента трения трубы по волоке влияет в основном на значения величины радиуса закругления профиля. С повышением коэффициента трения растет и радиус закругления трубного профиля. Такое положение связано, скорее всего, с ухудшением условий «затекания» металла в углы профиля волокна.

Были проведены также сравнительные расчеты профилирования трубы диаметром 30 и стенка 1,5 мм из нержавеющей стали 20, латуни Л63, стали 12Х18 Н10 Т и титана ВТ 1–0. Определено, что материал трубы (из рассмотренных) не оказывает значительного влияния на геометрию ее формоизменения. Имеет место лишь некоторое уменьшение зазоров в зоне отделения стенки от калибрующего пояска волокна для труб из труднодеформируемых сплавов (титан ВТ 1–0 и нержавеющая сталь).

Рассмотрим процесс профилирования, при котором выполняется полное протягивание трубы через профилирующую волоку от переднего до заднего конца. При этом наблюдается следующее явление. На переднем конце трубы стенки шестигранного профиля теряют устойчивость с образованием звездообразного профиля. Такое явление может быть объяснено малой жесткостью переднего конца трубы, взаимодействующего с остальной трубой только с одной стороны. Далее, звездообразный профиль плавно переходит в правильный шестигранный. Таким образом, участок с искажением профиля имеет длину 10–15 мм, т. е. 0,33–0,5 от наружного диаметра трубы.

Правильный шестигранный профиль составляет основную часть трубы. На заднем же конце трубы имеет место процесс, характеризующийся появлением «раструба» или плавного увеличения диаметра трубы к ее концу. Это явление может быть объяснено наличием упругого последействия, а также снижением удлинения, вследствие чего диаметр трубы увеличивается. Таким образом, диаметр описанной окружности профиля трубы меняется по его длине (рис. 3.11).

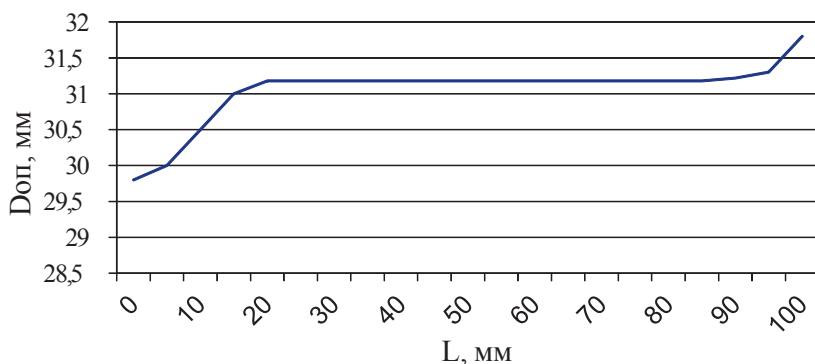


Рис. 3.11. Изменение диаметра описанной окружности профиля трубы по длине готового отрезка длиной 100 мм

Величина прогиба стенки (расстояния, на которое стенка трубы отходила от правильного шестигранного профиля) на концах трубы достигала величин 1,5 мм (для трубы  $31 \times 3$  мм), в основной части трубы не превышала 0,6 мм (рис. 3.12, 3.13).

Также выяснено, что явление потери стенкой устойчивости и образования звездообразного профиля в значительной степени зависит от выбора соотношения между периметром выходного сечения волокна, наружным диаметром трубы и ее толстостенностью. В случае профилирования труб диаметром 29 мм наблюдалось явление незаполнения профиля (рис. 3.14).

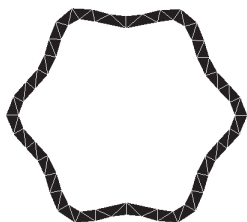


Рис. 3.12. Форма поперечного сечения переднего конца трубы

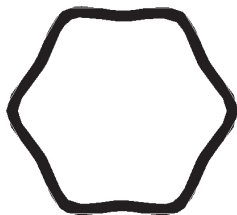


Рис. 3.13. Форма поперечного сечения основной части трубы

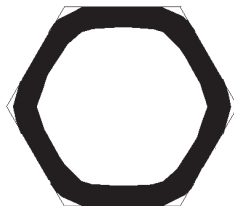


Рис. 3.14. Явление незаполнения профиля в сечении трубы на выходе из волоки

## **3.4. Напряженно-деформированное состояние металла при профилировании волочением**

---

### **3.4.1. Давление на инструмент**

Давление металла на инструмент изучено для трех характерных случаев профилирования: неполное заполнение профиля (рис. 3.15), значительная потеря устойчивости стенки (рис. 3.16), получение нормального шестигранного профиля (рис. 3.17). Эти данные приведены для случая профилирования трубы из стали 20, имеющей исходные размеры  $30 \times 1,5$  мм.

Исследование полученных картин распределения удельного давления на контакте трубы и профилирующего инструмента по мере перемещения трубы внутри волоки позволяет условно разделить процесс профилирования на три части.

В начале первой части профилирования труба входит в контакт с инструментом, происходит образование плоских участков на конце трубы. Зона контакта представлена в этом случае шестью пятнами контакта на плоскостях профильной волоки.



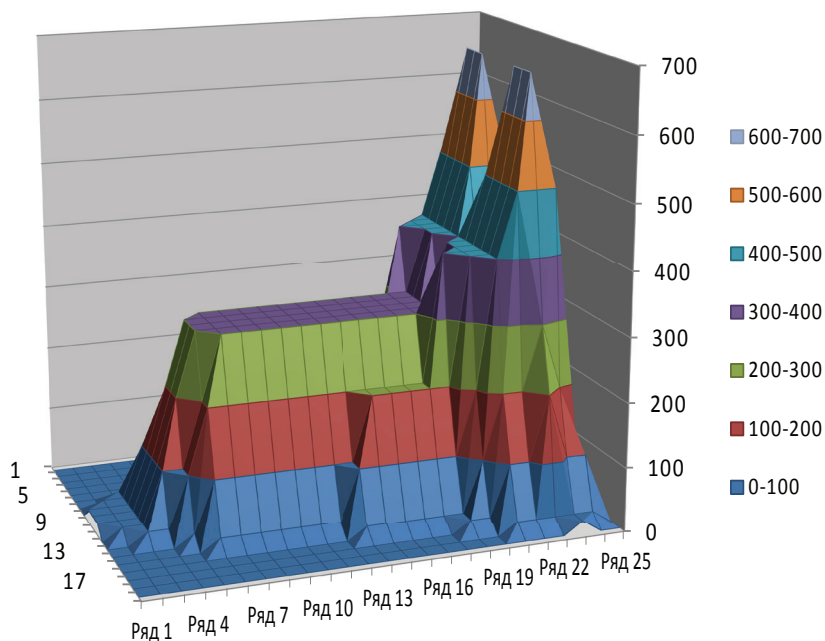


Рис. 3.15. Поверхность распределения давлений в зоне контакта на грани инструмента при незаполнении шестигранного профиля: цифры по вертикали — давления, МПа; ряд Р1–Р25 — вход и выход из очага деформации, ряд 1–19 — поперечное направление грани

Происходящая затем деформация трубы с образованием граней приводит к прогибу стенки внутрь (в большинстве случаев величина прогиба небольшая), которая сопровождается раздвоением пятна контакта и образованием картины распределения удельных давлений по плоскости грани шестигранной волоки в виде «вилки». Таким образом, контакт имеет место в 12 положениях контакта и на пятнах входа в контакт.

На третьем этапе труба проходит через выходной и калибрующий участок профильной волоки. Максимальное удельное давление по всему очагу деформации имеет место вблизи ре-

бер волоки в конце конусной ее части в месте сопряжения с калибрующим пояском.

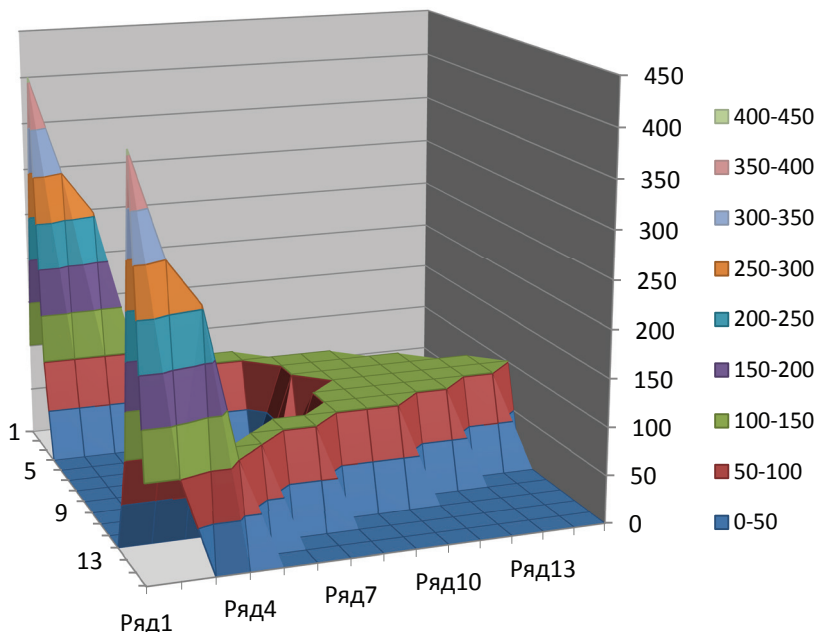


Рис. 3.16. Поверхность распределения давлений в зоне контакта на грани инструмента при потере шестигранным профилем устойчивости (обозначения как на рис. 3.15)

Вывод, который сделан по результатам анализа распределения удельных давлений на контакте, может быть выражен следующим образом. Поскольку опасной зоной по величине давления является зона выхода трубы из волоки (см. рис. 3.15), то именно этот участок должен быть спрофилирован таким образом, чтобы давления были распределены максимально равномерно. Такой вывод в то же время вступает в противоречие с необходимостью получения максимально точного шестигранного профиля трубы. Одним из возможных вариантов решения

возникшего затруднения может стать увеличение радиуса закругления на переходе из конусной части волокна в калибрующий участок, что позволит получить более равномерную картину распределения давлений в этой зоне при сохранении неизменной формы выходного сечения волокна.

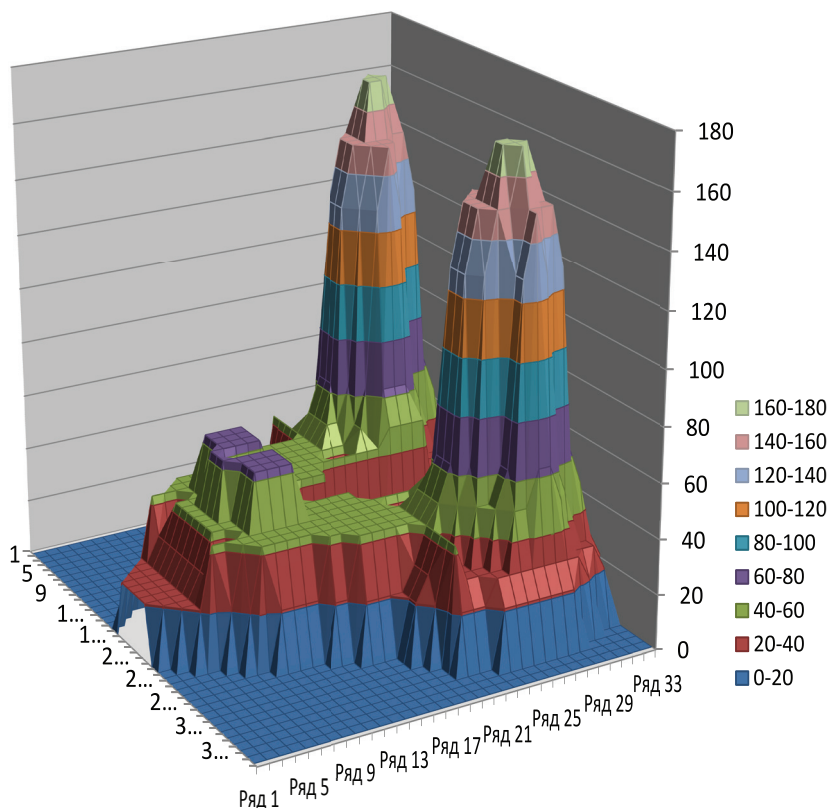


Рис. 3.17. Поверхность распределения давлений в зоне контакта на грани инструмента при получении нормального шестигранного профиля в волокне (тип 3) (обозначения как на рис. 3.15)

### 3.4.2. Интенсивность деформации

Для всех исследованных труб определялись величины интенсивности пластических деформаций в характерных точках поперечного сечения при выходе из волоки. Эти точки по сечению расположены следующим образом: т. 1 — на середине наружной грани, т. 2. — на середине внутренней грани, т. 3 — на наружной стороне угла профиля, т. 4 — на внутренней стороне последнего (рис. 3.18).

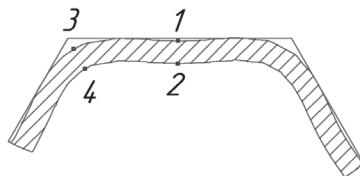


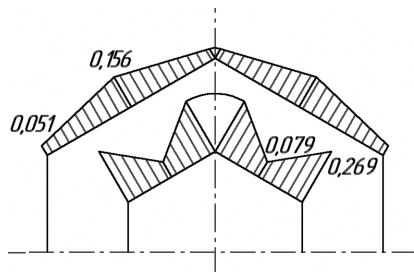
Рис. 3.18. Характерные точки поперечного сечения очага деформации

Следует отметить, что марка материала трубы мало влияет на распределение и величину интенсивности пластических деформаций. Определенные величины интенсивности пластических деформаций позволяют заключить то, что наиболее опасным, с точки зрения действующих пластических деформаций, является случай профилирования труб с происходящим переполнением профилировочного калибра и имеющей место в этом случае потерей устойчивости стенок трубы. В частности, в случае профилирования труб диаметром 32 мм, стенкой 1,5 мм величина интенсивности пластических деформаций в точке 4 достигает значения 0,496.

Необходимо также указать, что для всех рассмотренных случаев максимальное значение интенсивности пластической деформации для конкретного расчетного случая достигалось в точке 4 (рис. 3.19). Такое положение говорит о том, что ука-

занная область является опасной с точки зрения максимума деформаций.

*a*



*б*

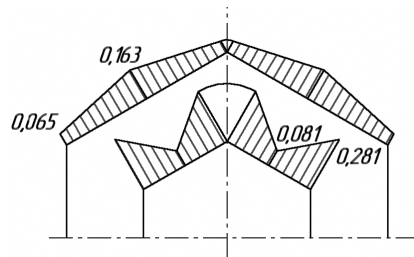


Рис. 3.19. Распределение значения интенсивности деформаций в поперечном сечении стенки трубы:

*a* — титан ВТ 1–0; *б* — латунь Л63

Минимальные значения деформаций (следовательно и максимально благоприятная картина деформаций) были достигнуты при профилировании труб  $30 \times 1$  мм (с незаполнением калибра) и коэффициентом трения, близким к 0. Получено значение интенсивности пластических деформаций, равное 0,325. Для этого же расчетного случая установлен минимальный для расчетных случаев уровень величин интенсивностей пластических деформаций в целом.

Рассмотрение точки 3, с точки зрения действующих пластических деформаций, позволило выявить малое отличие значений по расчетным случаям. Максимум значения интенсивности

пластических деформаций выявлен для случая профилирования трубы  $31 \times 3$  (0,149), минимум — для трубы  $32 \times 1,5$  (0,0676).

Установлено также, что значения величин интенсивностей пластических деформаций для точек 1 всех расчетных случаев больше на 20–70 % значений для точек 2, например, для случая профилирования трубы  $31 \times 1,5$  величина в точке 1—0,262, в точке 2—0,146. С ростом относительной толстостенности трубы  $S/D$  значения интенсивности деформаций, особенно для точек внутреннего контура, возрастают.

Полученные выводы позволяют заявить, что необходимым условием соблюдения безопасной и равномерной картины распределения величин интенсивностей пластических деформаций является прежде всего соблюдение правильного соотношения между диаметром трубы, толщиной ее стенки и периметром выходного сечения волокна.

### 3.4.3. Показатель напряженного состояния

Анализировали изменение показателя напряженного состояния  $\sigma/T$  по длине очага деформации (рис. 3.20) для точек 1 и 2 шестигранного профиля. Установлено, что на входе в очаг деформации существует небольшая зона, где значения этого показателя отрицательны. Далее по длине очага деформации в точке 1 этот показатель уменьшается, оставаясь все время отрицательным. Для точки 2 сначала этот показатель увеличивается, а затем — несколько уменьшается к выходу. Подобный характер изменения показателя  $\sigma/T$  имеется для точек 3 и 4.

Эпюры распределения значений показателя напряженного состояния  $\sigma/T$  для точек, расположенных на наружной и внутренней сторонах трубы, в случае профилирования труб из четырех рассмотренных материалов: стали 20, титана ВТ 1—0, латуни Л63 и стали 12Х18 Н10 Т (рис. 3.21 и 3.22). Толщина стенки трубы условно показана увеличенной.

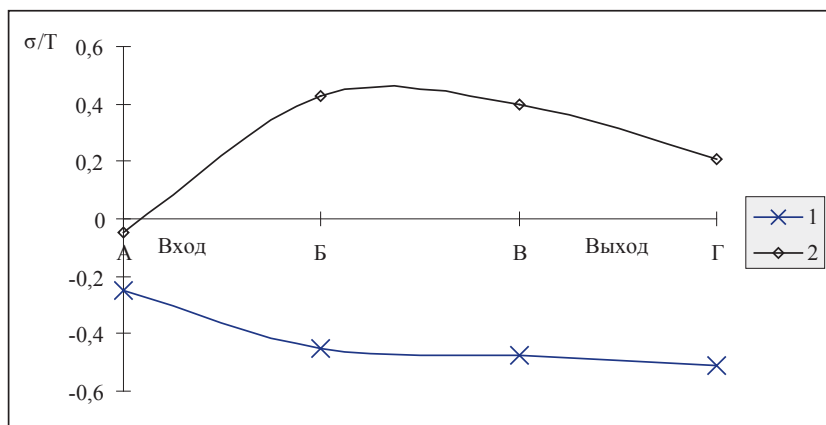


Рис. 3.20. Изменение показателя напряженного состояния по длине очага деформации 1 и 2 — точки профиля (материал — сталь 20)

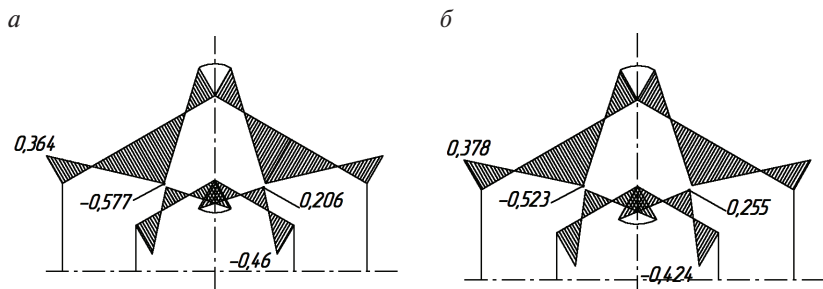


Рис. 3.21. Распределение среднего по длине очага значения показателя напряженного состояния в поперечном сечении стенки:

*а* — сталь 20; *б* — титан ВТ 1-0

Анализ вышеуказанных эпюр позволяет говорить как о их внешнем сходстве, которое, в свою очередь, подчеркивает сходство расположения зон сжатия и растяжения, так и о достаточно значительном различии величины значений показателя напряженного состояния в характерных точках для различных материалов.

В то же время можно с уверенностью выделить характерные точки для всех четырех исследованных материалов. Так,

в точке 1 (посередине грани снаружи) преобладают сжимающие напряжения, а в соответствующей ей точке 2 (на внутренней грани) — растягивающие напряжения. Обратная картина наблюдается в точках, расположенных на ребре готовой шестигранной трубы. В точке 3 (на ребре снаружи) имеют место преобладающие растягивающие напряжения, а в точке 4 (на ребре внутри) — сжимающие.

*аб*

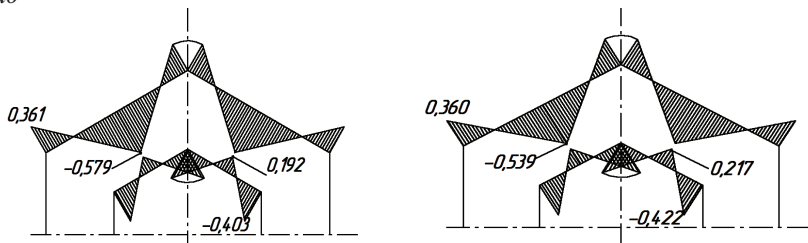


Рис. 3.22. Распределение среднего по длине очага значения показателя напряженного состояния в поперечном сечении стенки:

*а* — латунь Л63, *б* — сталь 12Х18Н10Т

Кроме того, установлено, что положительные значения показателя напряженного состояния и соответствующие ему растягивающие напряжения на наружной поверхности трубы превышают таковые для внутренней поверхности трубы. Та же картина наблюдается и для отрицательных значений показателя.

Максимальные положительные значения показателя напряженного состояния  $\sigma/T$  для всех исследованных материалов находятся в точке 3. Таким образом, указанная точка является опасной по наличию растягивающих напряжений.

### 3.4.4. Степень использования запаса пластичности

Исследование профиля трубы с целью определения степени использования ресурса пластичности материала трубы производилось в характерных точках поперечного сечения тру-



бы на трубах шестигранного профиля из 4 основных материалов: стали 20, титана ВТ 1–0, латуни Л63 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Профилирование велось при наличии незначительного перепополнения трубного профиля и соответствующего этому процессу явления потерей гранью профиля устойчивости.

Анализ полученных значений степени использования ресурса пластичности материала трубы для различных исследованных материалов показал (рис. 3.23, 3.24), что наиболее высокие значения указанной степени (0,91) достигаются для случая профилирования труб из титана ВТ 1–0. Такая величина позволяет, с учетом статистического распределения свойств материала трубы, говорить о наличии значительной опасности разрушения труб из этого материала в процессе профилирования, а особенно при дальнейшей интенсивной эксплуатации. Такое положение является недопустимым, поэтому возникает необходимость совершенствования процесса, например, с применением схемы профилирования в несколько проходов с промежуточной термообработкой.

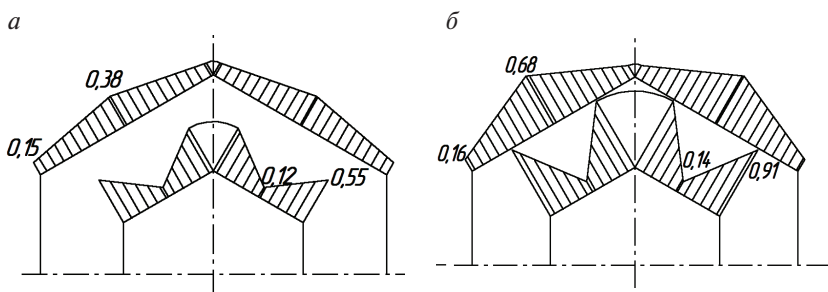


Рис. 3.23. Распределение степени использования ресурса пластичности в поперечном сечении стенки:

*a* — сталь 20; *б* — титан ВТ 1–0

Несколько меньшие значения степени использования ресурса пластичности имеют место для труб из стали 20, для которой наблюдается более равномерное, чем для титана, распределе-

ние степени по характерным точкам на внутренней и наружной поверхностях трубы.

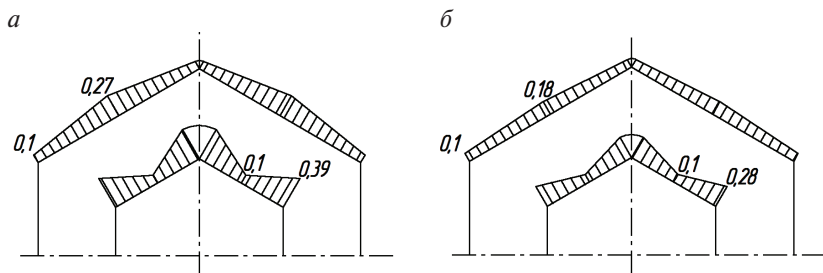


Рис. 3.24. Распределение степени использования ресурса пластичности в поперечном сечении стенки:

*a* — латунь Л63; *б* — сталь 12Х18Н10Т

Степень использования запаса пластичности при профилировании труб из латуни Л63 в полной мере соответствует высоким пластическим свойствам этого материала и не превышает величины 0,39 в опасных точках сечения.

В то же время наблюдаются парадоксально низкие значения степени использования ресурса пластичности для труб из стали 12Х18Н10Т. Это явление объясняется проявлением высоких пластических свойств материала в зоне преобладающих сжимающих напряжений, которые и имеют место в точках максимальных степеней использования ресурса пластичности. Таким образом, для этого материала имеет место практически равномерное распределение степени использования запаса пластичности при наличии низких значений степени (максимальное значение не превышает 0,28). Такие результаты позволяют говорить о возможности профилирования труб из стали 12Х18Н10Т со значительно более высокими степенями деформации, например в случае получения труб с развитым (звездообразным и другим) профилем.

Кроме указанных закономерностей, выявлены опасные по степени использования ресурса пластичности точки. Такими точками являются т. 1 и т. 4, поскольку для всех рассмо-

тренных случаев максимальные значения степени использования ресурса пластичности имеют место именно в них. Эти точки расположены в зонах с отрицательными значениями показателя напряженного состояния  $\sigma/T$ , а следовательно, в зонах с преобладающими сжимающими напряжениями.

На этой основе сделан вывод, что низкие значения степени использования ресурса пластичности для случая профилирования труб из стали 12Х18 Н10 Т могут быть достигнуты лишь при полном заполнении или некотором переполнении профиля, в случае же незаполнения могут иметь место сходные или даже большие значения степени использования ресурса пластичности.

### **3.5. Профилирование труб с использованием проталкивания, подпора и противонатяжения**

---

Помимо моделирования процесса профилирования в волокнах различного волоочильного инструмента, определяющим будет степень использования ресурса пластичности типоразмеров. Были проанализированы процессы профилирования труб волочением, заталкиванием трубы в волоку при помощи толкающих устройств, а также заталкиванием при наличии встречного подпора на выходном конце трубы.

Все вышеуказанные способы моделировались при профилировании квадратной трубы в волоке одной и той же формы, а именно с плавным переходом от круга к квадрату, с прямолинейным калибрующим участком и плавным переходом от конусной рабочей к прямолинейной калибрующей части. Угол конусности рабочей части составлял  $8^\circ$ . Размер выходного квадрата — 25 мм. Проводилось исследование формоизменения труб, имеющих исходный диаметр 30 мм.

В процессе расчета анализировались следующие величины, характеризующие процесс:

1. Максимальная интенсивность деформаций.
2. Показатель напряженного состояния  $\sigma/T$ .
3. Степень использования ресурса пластичности  $\omega$ .
4. Распределение давлений по поверхности волокни.

Поскольку при разработке технологии и оценке стойкости волоочильного инструмента определяющим будет степень использования ресурса пластичности и давление на инструмент, то ниже приведены результаты анализа лишь по этим показателям.

Исследование степени использования ресурса пластичности производилось в опасной точке сечения трубы, расположенной на внутренней поверхности трубы на ребре готового профиля (т. 4). Было установлено, что для случая профилирования волочением (осуществляется профилирование вышеуказанного типоразмера квадратной трубы из стали 20) происходит полное исчерпание ресурса пластичности (величина степени использования ресурса пластичности 1,2), что говорит о невозможности осуществления процесса с данной схемой приложения рабочих нагрузок без применения многопроходной технологии профилирования, промежуточных термообработок и др.

В случае профилирования с заталкиванием (приложением нагрузок к заднему концу трубы) достигается значительное снижение степени использования запаса пластичности до величины 0,63, вследствие чего возникает принципиальная возможность профилирования труб указанного типоразмера за один проход без осуществления дополнительных, зачастую весьма дорогостоящих операций.

Кроме того, профилирование заталкиванием с использованием дополнительного встречного подпора постоянным давлением ( $0,4 \sigma_s$ ) с переднего конца трубы позволяет добиться дополнительного снижения степени использования ресурса пластичности до величины 0,59.

Для случая профилирования труб из титана ВТ 1–0 наблюдаются еще более значительные степени использования ресурса пла-

стичности. Для профилирования волочением происходит полное исчерпание ресурса пластичности, в случае проталкивания величина ресурса равна 0,7, а в случае проталкивания с подпором — 0,57, т.е. только применение подпора для указанного материала и типоразмера трубы позволяет снизить степень использования ресурса пластичности материала в опасных точках сечения на 13%.

Таким образом, использование схемы профилирования с заталкиванием, а в особенности и с передним подпором, позволяет получить возможность профилирования труб в инструменте весьма простой конфигурации при тех же условиях трения, а также осуществить значительную экономию времени и ресурсов при повышении надежности готовых труб.

Исследуя распределение давления, прежде всего была проанализирована величина максимума абсолютного значения давления на поверхности контакта трубы и волокна. Установлено, что значительного повышения давления в связи с переходом со схемы с протягиванием трубы на схему с заталкиванием и далее заталкиванием и подпором не происходит. Максимум давления для случая волочения составляет 289 МПа, для случая проталкивания — 281 МПа, для случая проталкивания с подпором — 290 МПа. Вышеуказанные факты позволяют заключить, что применение схем приложения рабочих нагрузок с проталкиванием не приводит к повышению скорости износа рабочего инструмента вследствие повышенных давлений.

### **3.6. Анализ поврежденности металла при формовке профильных труб из листа**

---

Разработанная в разд. 2.5 методика позволила создать алгоритм расчета степени использования запаса пластичности, схема которого приведена на рис. 3.25. Ниже дано описание работы этого алгоритма и анализ результатов, полученных с его использованием.

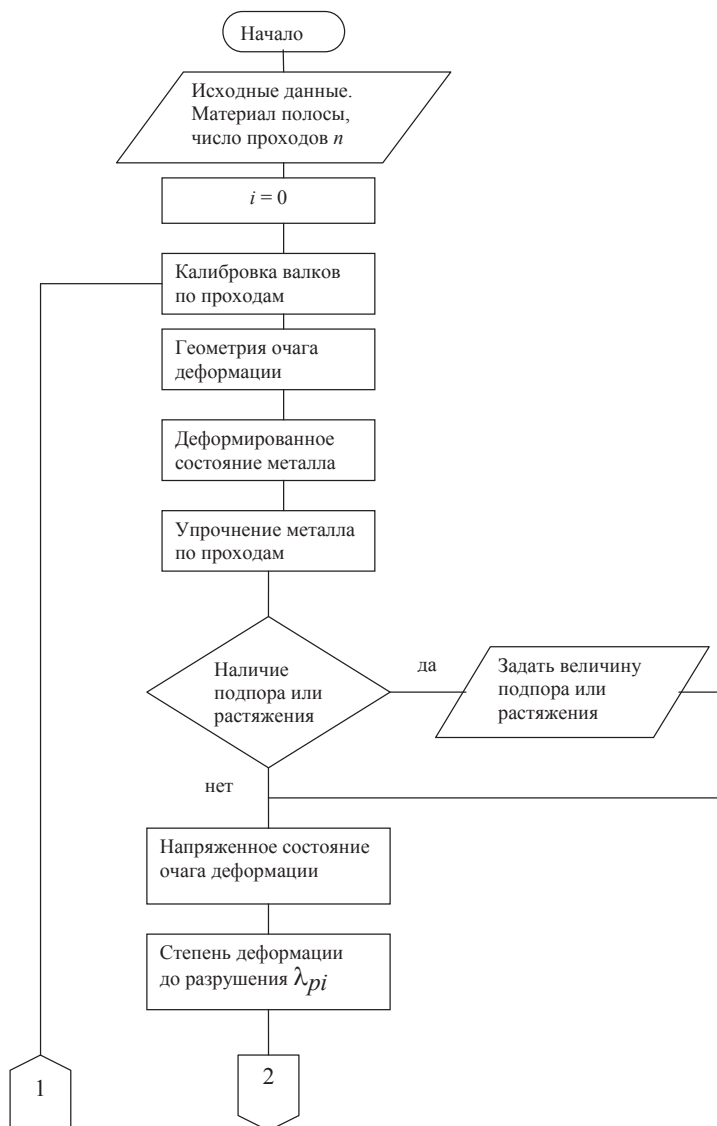


Рис. 3.25. Блок-схема алгоритма расчета степени использования запаса пластичности при формовке профильных труб из листа

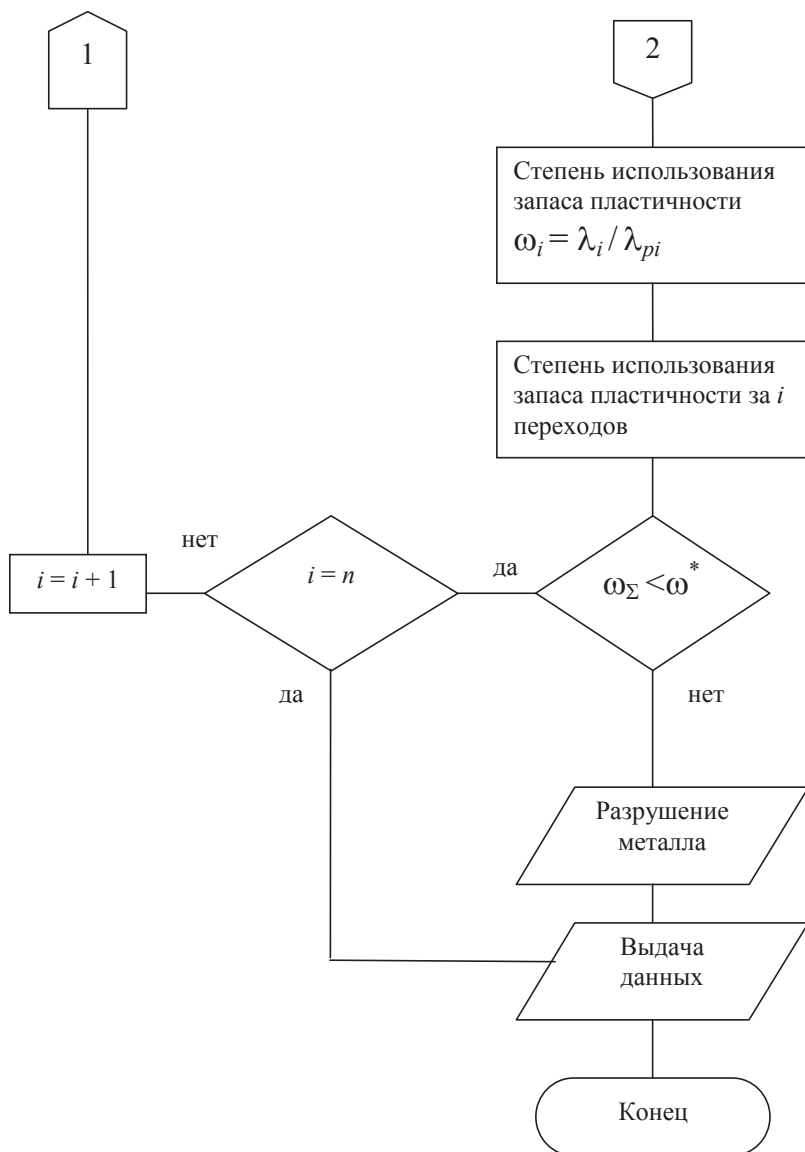


Рис. 3.25. Окончание (начало см. на с. 108)

В блоке исходных данных задается толщина полосы и ее материал. По материалу полосы определяются параметры  $(\sigma_{s_0}, g, b)$  кривой упрочнения (2.22). Задается число переходов профилирования  $n$ .

Калибровка валков по переходам определяет радиусы изгибов полосы и углы подгибки, т.е. геометрические параметры очага деформации и, в частности, утонение стенки и радиусы нейтральной линии.

Деформированное состояние полосы (2.42) определяется интенсивностью деформации за переход и накопленной степенью деформации сдвига (2.48).

По приведенной выше схеме рассчитывается упрочнение металла по переходам. При необходимости задается наличие тангенциального подпора  $\sigma_n$  или натяжения  $\sigma_p$  в калибре в виде

$$\sigma_n = -a\sigma_{si}, \quad \sigma_p = b\sigma_{si},$$

где  $a$  и  $b$  — положительные величины, причем  $0 \leq a \leq 1$ ;  $0 \leq b \leq 1$ .

В следующем блоке расчета определяются напряжения  $\sigma_p$  и  $\sigma_\theta$  (2.42), гидростатическое давление и показатель напряженного состояния (2.45 и 2.46).

На основе аппроксимирующей функции (2.24) определяется при известных  $\mu_\sigma$  и  $\sigma/T$  степень деформации до разрушения. Далее вычисляем степень использования запаса пластичности за переход и за несколько переходов (2.35). В том случае, когда  $\omega_\Sigma < \omega^*$ , то вычисления повторяются с новыми значениями параметров калибровки валков, а при исчерпании ресурса пластичности выдается необходимая маркировка. Если разрушения металла не наступает, то расчет вышеперечисленных параметров повторяется до тех пор, пока не будут рассчитаны все переходы профилирования.



В том случае, когда будет проводиться расчет параметров напряженно-деформированного состояния при повышенных температурах, то следует ввести дополнительные блоки, позволяющие задавать (или рассчитывать) температуру металла по переходам, находить с учетом этого параметры упрочнения металла и напряженное состояние, а степень деформации до разрушения  $\lambda_{pi}$  определять с учетом температуры.

Поскольку процесс формовки профильных труб представляет собой изгиб листа по нескольким ребрам, то в качестве примера с использованием описанного алгоритма для конкретной схемы формовки профиля 105×80×4 мм (рис. 3.26) из стали 10 проведен расчет, результаты которого приведены в табл. 3.1. Рассчитывались геометрические параметры очага деформации, единичная степень деформации  $\lambda_i$ , накопленная степень деформации  $\lambda_\Sigma$ , значения сопротивления деформации, а также степень использования запаса пластичности для трех случаев: при отсутствии подпора или растяжения  $\omega_\Sigma$ , при наличии подпора  $\omega_{\Sigma П}$  и растяжения  $\omega_{\Sigma Р}$ .

Расчеты показали, что в рассмотренной калибровке валков степень деформации по клетям изменяется мало, а суммарная степень деформации нарастает практически по линейной зависимости (рис. 3.27). Накопленная степень использования запаса пластичности (рис. 3.28) при отсутствии подпора или натяжения меньше, чем при наличии растяжения, и больше, чем при наличии подпора.

С ростом величины тангенциального подпора полосы степень использования запаса пластичности (рис. 3.29 и 3.30) снижается.

Таким образом, на основе предложенной методики и разработанного алгоритма возможен численный анализ степени использования запаса пластичности в процессах формовки из листа с наложением в очаге деформации тангенциального подпора или растяжения.

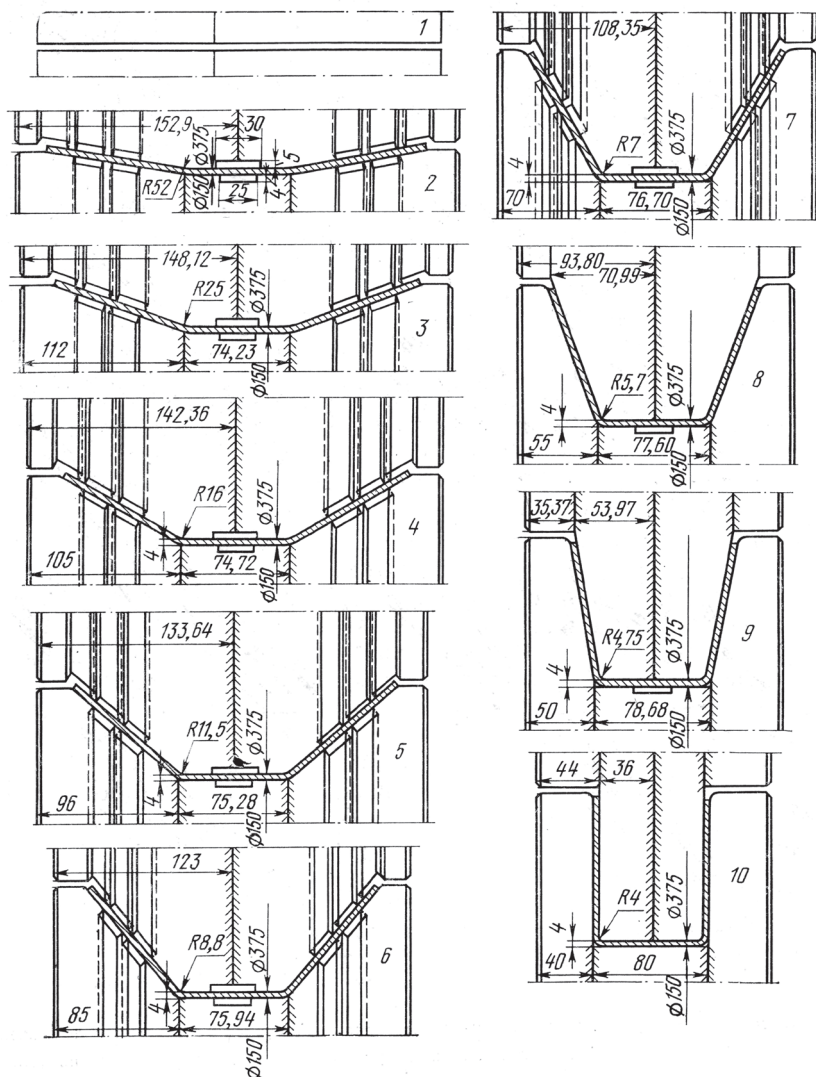


Рис. 3.26. Схема процесса формовки профиля 105×80×4 мм

Таблица 3.1

Результаты расчета параметров процесса формовки профиля 105×80×4 мм

Номер клетки	$r_B$	$\rho_H$	$\lambda_i$	$l_s$	$\sigma_{sp}$ , МПа	$\Pi_p$ , МПа	$\omega_s$	$\omega_{\Sigma\Pi}$	$\omega_{\Sigma P}$
2	52,00	53,96	0,074	0,074	541,50	430,074	0,076	0,053	0,110
3	25,00	26,93	0,074	0,148	541,60	333,577	0,152	0,105	0,220
4	16,00	17,89	0,075	0,223	541,60	286,864	0,229	0,158	0,331
5	11,50	13,35	0,076	0,299	541,70	257,517	0,307	0,212	0,444
6	8,80	10,61	0,076	0,375	541,80	236,924	0,385	0,266	0,557
7	7,00	8,78	0,076	0,451	541,90	221,368	0,463	0,320	0,670
8	5,70	7,44	0,080	0,531	541,97	208,457	0,545	0,377	0,789
9	4,75	6,45	0,079	0,610	542,00	198,085	0,626	0,433	0,906
10	4,00	5,66	0,082	0,692	543,00	189,101	0,710	0,491	1,028

Примечание: 1. Материал — сталь 10; 2. Значения относительного подпора и растяжения составляют 0,5.

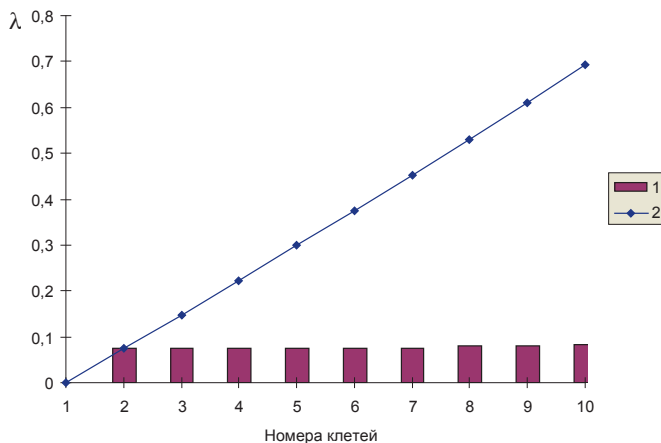


Рис. 3.27. Изменение степени деформации  
в зависимости от номера клетки:

1 — единичная; 2 — суммарная

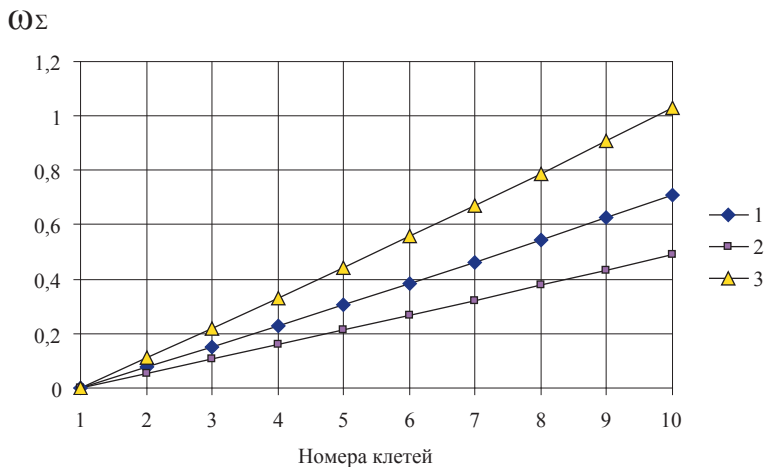


Рис. 3.28. Изменение степени использования запаса пластичности  
по клетям:

1 — при отсутствии подпора; 2 — значении подпора  $0,5 \sigma_s$ ;  
3 — наличии растяжения величиной  $0,5 \sigma_s$  (материал — сталь 10)

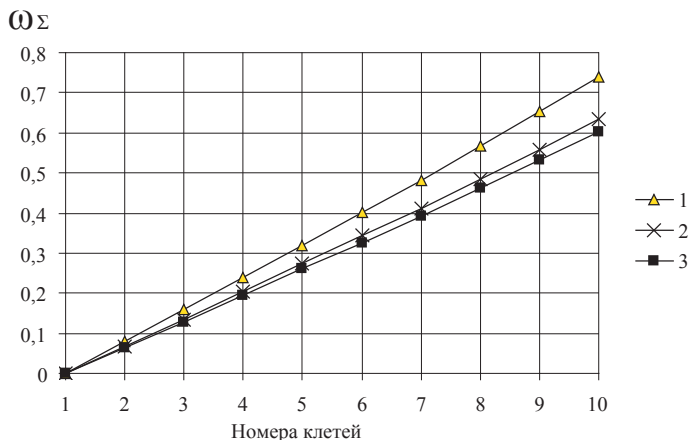


Рис. 3.29. Изменение степени использования запаса пластичности по клетям:

1 — при отсутствии подпора; 2 — значения подпора  $0,5 \sigma_s$ ;  
3 — при наличии подпора величиной  $0,7 \sigma_s$  (материал — титан ВТ 1-0)

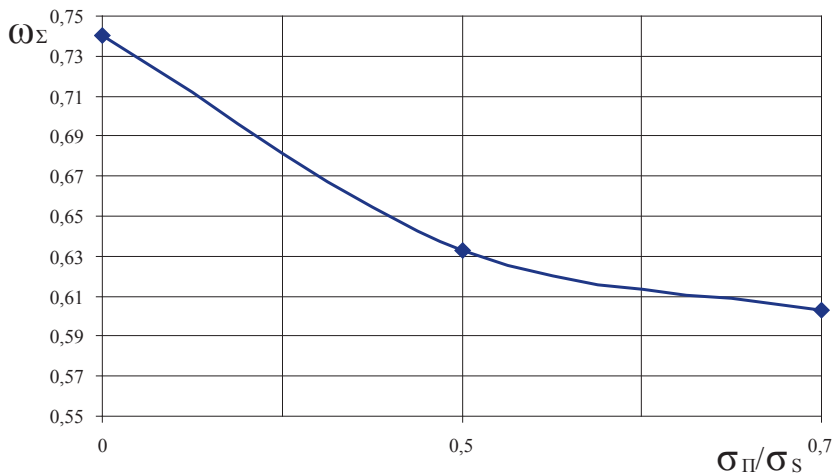


Рис. 3.30. Зависимость степени использования запаса пластичности от величины тангенциального подпора в калибре (материал — титан ВТ 1-0)

### **3.7. Рекомендации по совершенствованию технологических процессов**

---

На основе выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по совершенствованию процессов профилирования труб. Эти рекомендации касаются выбора рационального профиля канала деформирующего инструмента, типа приложения деформирующего усилия, выбора места отжига исходя из степени использования запаса пластичности и др.

#### **1. Выбор рационального профиля канала волокна**

Существует несколько основных целей выбора рациональной геометрии канала волокна. Среди них, как уже было показано, могут быть названы следующие:

- снижение степени использования ресурса пластичности материала трубы как в опасных точках поперечного сечения, так и в целом по сечению;

- сглаживание пиков давления на контакте трубы и волокна и, как следствие, более равномерное распределение давления на контакте. Указанный параметр в значительной мере влияет на скорость износа рабочего канала волокна.

На этой основе в некоторых случаях возможна замена довольно дорогого и сложного в изготовлении твердосплавного инструмента на стальной, что снижает стоимость производства. При изготовлении труб со сложным профилем такая замена является единственно возможным способом производства. Указанные выше соображения вообще могут быть положены в основу выбора материала волокон:

- снижение тягового усилия профилирования;
- уменьшение величины раструбов на переднем и хвостовом участках трубы.

Рассмотрим более подробно влияние радиуса скругления в месте перехода из профилирующего в калибрующий участок на величину давления по контактной поверхности. Такое влияние объясняется уменьшением кривизны траектории течения металла, вследствие чего не возникает резкой концентрации давления в зоне перехода между участками.

Кроме того, применение волок с продольной формой канала, плавно изменяющейся от круглого поперечного сечения к профильному, позволяет добиться смены типа контакта на входе трубы в волоку. В случае использования волок с каналом в виде усеченной пирамиды круглая труба вначале вступает в контакт с серединами граней профилирующего участка и лишь затем, по мере образования соответствующих граней на трубе, контакт приобретает тип «поверхность — поверхность». Результатом этого явления может быть возникновение зоны быстрого износа волокна в точке начального контакта трубы и волокна. Этот эффект может особенно сильно проявляться для труднодеформируемых материалов, например сплавов титана.

Недостатком, в значительной мере характеризующим волокна с плоскими гранями на профилирующем рабочем участке, является недостаточная точность центрирования трубы на входе. Это явление особенно характерно при волочении труб со значительной погрешностью овализации или с большим эксцентриситетом внутреннего диаметра относительно наружного и связанной с этим переменной по окружности жесткостью профиля.

Из указанного недостатка точности центрирования вытекает ряд следствий, среди которых явление недопрофилирования одной из граней, искривление углов профиля, серповидность труб по длине. Кроме того, даже при незначительном переполнении калибра происходит смещение потери устойчивости стенок на одну из граней, где потеря устойчивости превышает допустимую.

Таким образом, для получения точных профилей волокна этого типа могут быть использованы лишь при достаточной точности подачи трубы в волоку, высоком классе точности труб — за-

готовок, а также точности изготовления самой волоки. Должны быть также выдержаны режимы смазки трубы.

В отличие от волок указанного типа волоки с плавным переходом из круглого в профильное сечение обеспечивают надежное центрирование заготовки при входе в волоку за счет входного конического участка. Кроме того, волоки последнего типа позволяют достичь ряда других положительных эффектов, среди которых возникновение сил подпора, встречающих к направлению волочения за счет трения. Указанные силы возникают с самого начала процесса профилирования (с момента входа трубы в волоку) и действуют в наиболее опасных по степени использования ресурса пластичности зонах (в углах трубного профиля).

Использование волок этого типа совместно с применением плавного радиального перехода между профилирующей и калибрующей зонами позволяет полностью избежать на всей зоне контакта трубы и волоки неблагоприятных типов контакта вида «прямая — плоскость» и «точка — плоскость», приводящих к возникновению локальных пиков давления.

Следует указать, что для мелкосерийных производств, например для установок получения профильных труб, расположенных при цехах сборки металлоконструкций, могут возникнуть дополнительные ограничения по сложности канала волоки, связанные с принципиальной возможностью изготовления инструмента с высокой твердостью, например твердосплавного, имеющего сложную форму канала. В этом случае выбор канала ограничивается указанием правильного соотношения периметров трубы и калибрующего участка волоки, а также определением угла конусности рабочего участка волоки.

## **2. Выбор периметра заготовки**

Значительное влияние оказывает на форму и точность готового профиля соотношение периметров исходной заготовки и калибрующей части волоки.



Кроме того, при создании волок с каналом, имеющим плавный переход от круглой к профильной форме, положительное влияние на точность профиля оказывает получение такого профиля канала, при котором периметр всех отдельно взятых сечений плавно изменяется от периметра исходной трубы к периметру готового профиля.

### **3. Тип приложения сил**

Установлено, что способ приложения рабочих нагрузок к системе «заготовка — волок» в значительной степени определяет как напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации и энергосиловые параметры процесса, так и степень использования ресурса пластичности материала готовых труб.

Применение способов, связанных с заталкиванием трубы в волок, например, при помощи блока приводных роликов или тракового толкающего устройства, позволяет добиться в некоторых случаях значительного (до 2 раз) снижения степени использования запаса пластичности при сохранении точности готового профиля и высокой стойкости инструмента. Применение встречного подпора на переднем конце, кроме указанного, позволяет добиться еще некоторого снижения степени использования запаса пластичности при незначительном повышении уровня давлений на рабочей поверхности инструмента.

Использование указанных способов профилирования не снижает универсальности оборудования по сравнению с методами волочения на станах известных конструкций и не приводит к значительному его удорожанию.

### **4. Выбор места отжига исходя из ресурса пластичности**

В случае, если материал трубы (особенно в опасных зонах профиля) близок к исчерпанию ресурса пластичности, а процесс профилирования еще не завершен, возможно проведение промежуточного отжига с последующим завершением процес-

са профилирования труб заданных конфигураций и размеров. Разработанная методика позволяет точно указать наиболее выгодный момент для проведения промежуточного отжига, предсказать степень использования ресурса пластичности материала по завершению всех операций. Таким образом, может быть получен профиль с минимальным количеством операций термообработки, обладающий требуемой надежностью по пластичности. Указанная методика может быть использована для создания принципиальной возможности получения профилей сложного сечения из материалов с низкой пластичностью, например легированных сталей, сплавов титана и циркония и др.

### **5. Смазка при профилировании**

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что снижение коэффициента трения, например с 0,2 до 0,1, приводит к значительному снижению усилия профилирования (практически в 2 раза). В самом деле, профилирование труб волочением без оправки в отношении давления на инструмент занимает промежуточное положение между безоправочным волочением круглых труб и оправочным волочением.

Следовательно, большое значение приобретает смазка, используемая в процессе. Для труб из труднодеформируемых материалов процесс нанесения смазки имеет сложный многостадийный характер и включает нанесение подсмазочных и смазочных слоев, как например фосфатирование, или нанесение иных адгезионных покрытий, и собственно нанесение смазки [91]. При этом нет необходимости подвергать внутреннюю, не взаимодействующую с волокой поверхность трубы этим процедурам, для чего необходимо предусмотреть ее защиту путем установки заглушек на концах труб, а для бухтового волочения — заковыванием концов бухты.

Для труб из низкоуглеродистых сталей, латуни и других легкодеформируемых материалов нанесение смазки целесообразно производить ее подачей непосредственно на входе в волоку.

## Библиографический список

---

1. Аверченков В. И. Основы математического моделирования технических систем : учеб. пособие / В. И. Аверченков, В. П. Федоров, М. Л. Хейфец. [электронный ресурс]. — 2-е изд., стер. — М.: ФЛИНТА, 2011. — 271 с.
2. Рыбин Ю. И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением / Ю. И. Рыбин. — СПб.: СПбГПУ, 2004. — 642 с.
3. Чумаченко Е. Н. Математическое моделирование и оптимизация процессов деформирования материалов при обработке давлением : науч. изд. / Е. Н. Чумаченко, И. В. Логашина. — М.: ООО НПП «Экомет», 2008. — 400 с.
4. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex : учеб. курс. — М.: Изд-во Питер, 2010. — 336 с.
5. Данченко В. Н. Производство профильных труб : научное изд. / В. Н. Данченко, В. В. Сергеев, Э. В. Никулин. — М.: Интернет Инжиниринг, 2003. — 224 с.
6. Данченко В. Н. Технология трубного производства : учебник для вузов / В. Н. Данченко [и др.]. — М.: Интернет инжиниринг, 2002. — 638 с.
7. Шевакин Ю. Ф. Машины и агрегаты для производства стальных труб : учебник / Ю. Ф. Шевакин [и др.]. — М.: Интернет Инжиниринг, 2007. — 388 с.
8. Осадчий В. Я. Технология и оборудование трубного производства : учебник / Осадчий В. Я. [и др.]. — М.: Интернет Инжиниринг, 2001. — 608 с.

9. Шевакин Ю. Ф. Производство труб : учебное пособие / Ю. Ф. Шевакин, А. П. Коликов, Ю. Н. Райков. — М.: «Интермет Инжиниринг», 2005. — 568 с.
10. Поляков С. А. Математические модели и моделирование объектов машиностроительного производства : учебное пособие / С. А. Поляков. — М.: Изд-во Московского государственного открытого университета, 2011. — 104 с.
11. Паршин С. В. Процессы и машины для изготовления профильных труб / С. В. Паршин. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 356 с.

# Содержание

---

Введение .....	3
1. Оборудование для производства профильных труб. Методы теоретического исследования процесса .....	7
1.1. Сортамент профильных труб .....	7
1.2. Способы получения профильных труб.....	11
1.3. Оборудование для профилирования труб .....	18
1.4. Требования к качеству, виды брака.....	23
1.5. Существующие методы теоретического исследования параметров очага деформации при профилировании труб.....	29
1.6. Постановка задач исследования .....	41
2. Разработка моделей процесса получения профильных труб .....	44
2.1. Геометрические модели при волочении и особенности процесса получения многогранных труб .....	44
2.2. Основные уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние металла при профилировании.....	48
2.3. Выбор метода исследования напряженно-деформированного состояния металла при волочении.....	59
2.4. Конечно-элементная модель очага деформации .....	63
2.5. Методика расчета степени использования ресурса пластичности при формовке профильных труб из листа.....	77

---

3. Анализ процесса профилирования труб и рекомендации по его совершенствованию.....	82
3.1. Диапазон варьируемых параметров.....	82
3.2. Рациональная геометрия волочильного канала.....	84
3.3. Влияние варьируемых параметров на формоизменение трубы .....	91
3.4. Напряженно-деформированное состояние металла при профилировании волочением .....	94
3.5. Профилирование труб с использованием проталкивания, подпора и противонатяжения .....	105
3.6. Анализ поврежденности металла при формовке профильных труб из листа .....	107
3.7. Рекомендации по совершенствованию технологических процессов.....	116
Библиографический список.....	121





### **ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ ПАРШИН**

профессор кафедры «Металлургические и роторные машины», доктор технических наук. Автор более 500 научных работ, среди них 11 книг и брошюр, 60 изобретений и патентов. Область научных интересов — технологии и машины обработки давлением (прокатка, волочение,ковка,штамповка,профилирование).



### **НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА СЕМЕНОВА**

доцент кафедры «Инженерная графика», кандидат технических наук. Имеет 35 публикаций. Автор 4 учебных пособий. Область научных интересов — изготовление цельнотянутых и сварных профильных труб (машины и процессы).